

Escuela Politécnica Superior
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales
2017-2018



Trabajo Fin de Grado

Sistema de antenas móviles para la localización de descargas parciales

Sara Olivares Rodríguez

Dirigido por Guillermo Robles Muñoz

Leganés, 4 de julio de 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons
Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

A mis padres y hermano por acompañarme y ayudarme a superar las dificultades del camino. También a Christian por apoyarme y creer en mí siempre.

A todos ellos por la paciencia y el cariño recibido. Os quiero.

RESUMEN

El objetivo principal del trabajo es diseñar y automatizar un soporte móvil de antenas para la localización de descargas parciales. El método más extendido hoy día en la localización de fuentes emisoras de descargas parciales en subestaciones abiertas está basado en emisiones electromagnéticas en las bandas VHF y UHF cuyas medidas se toman mediante cuatro antenas fija. En 2018 se ha propuesto un método novedoso que localiza una fuente emisora de descargas parciales con tan solo dos antenas móviles basándose en la relación geométrica y en el movimiento relativo entre las antenas, además de en la diferencia de tiempos de llegada de la señal emitida [1]. Para la automatización del soporte, se ha usado un motor paso a paso controlado por el microprocesador ESP8266. Además, se ha diseñado una aplicación para Android utilizando AppInventor que facilita la comunicación WiFi con el circuito electrónico de control.

Una vez fabricado el soporte móvil, se ha realizado un ensayo en el laboratorio de alta tensión para verificar la fiabilidad del método propuesto de localización con dos antenas móviles.

Palabras clave: Medidas en radiofrecuencia, comunicación WiFi, descarga parcial, localización, multilateración, mantenimiento basado en la condición del equipo.

ABSTRACT

The main target of this work is the design and the automatization of a mobile antenna support for the location of partial discharges. Nowadays, the most common method for location of partial discharge sources in outdoor substation is based on VHF and UHF electromagnetic signal emission and measurements are done by four fixed antennas. In 2018 a new acoustic method is proposed for the location of partial discharges with only two mobile antennas. This method is based in the geometric relation and relative movement between the antennas, in addition to the times of arrival of the emitted signal. In order to automate the mobile support, a stepper motor controlled by a microprocessor is coupled to the support. Also, the control electronic circuit is designed to be handled by WiFi connexion. For this purpose, an Android application is programmed which makes easier the movement control of the antenna support.

Once the mobile support is manufactured, a test was done in the high-voltage laboratory to verify the reliability of the new proposed method.

Key words: Radio-frequency measurements, WiFi communication, partial discharge, location, multilateration, maintenance based on equipment condition.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II: LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES	3
2.1. Algoritmos de localización	3
2.2. Tiempo de llegada, ToA	5
2.3. Diferencia de tiempos de llegada, TDoA.....	8
2.4. Errores en la localización de fuentes	9
CAPÍTULO III: LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES CON DOS ANTENAS	12
3.1. Localización en el plano	12
3.1.1. Intersección de mediatrices.....	14
3.1.2. Expresión analítica de la función periódica.....	14
3.2. Localización en el espacio	16
3.3. Separación y localización de dos o más fuentes	18
CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SOPORTE.....	20
4.1. Especificaciones y requisitos	20
4.2. Primeros modelos y su evolución	22
4.2.1. MODELO 1	22
4.2.2. MODELO 2	24
4.2.2.1. Transmisión de movimiento	25
4.2.2.2. Cojinetes	27
4.2.2.3. Resolución final del MODELO 2.....	29
4.3. Comparación de modelos.....	31
4.4. Resolución final del soporte.....	32
CAPÍTULO V: AUTOMATIZACIÓN DEL SOPORTE.....	35
5.1. Motor NEMA23.....	35

5.2. Driver DRV8825.....	38
5.3. Placa de desarrollo NodeMCU	41
5.3.1. Pineado de la placa	45
5.3.2. Programación de la placa NodeMCU	46
5.4. Aplicación Motor Spin Controller	51
5.5. Montaje del circuito electrónico de control	55
CAPÍTULO VI: ENSAYO DE LA LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS	
PARCIALES	57
6.1. Puesta en marcha	57
6.2. Datos y medidas.....	58
6.3. Análisis de medidas y localización	60
6.4. Resultados del ensayo	61
CAPÍTULO VII: MARCO REGULADOR	63
7.1. IEC 60270: Técnicas de ensayo en alta tensión – Medidas de las descargas parciales.	63
7.2. IEC TS 62478: Técnicas de ensayo en alta tensión – Medidas de descargas parciales por métodos electromagnéticos y acústicos.....	64
CAPÍTULO VIII: ENTORNO SOCIOECONÓMICO.....	65
8.1. Mercado actual.....	65
8.2. Plan de explotación	65
8.3. Presupuesto del TFG.....	66
8.3.1. Costes directos: recursos humanos	66
8.3.2. Costes directos: adquisición de material.....	67
8.3.3. Costes fijos: equipos y licencias	67
CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS	70
LISTADO DE ACRÓNIMOS	75
ANEXO B – Código de programación para NodeMCU	77
ANEXO C – Programación por bloques de la aplicación Motor Spin Controller .	80
ANEXO D – Guía rápida de uso de la aplicación Motor Spin Controller	81
ANEXO E – Costes de adquisición de material	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 2.1 Coordenadas esféricas [14]	5
Fig. 2.2 Inicio de la señal según el criterio del máximo valor [5]	6
Fig. 2.3 Inicio de la señal según el criterio del valor umbral [5]	6
Fig. 2.4 Inicio de la señal según el criterio de la pendiente umbral [5]	6
Fig. 2.5 Señal de descarga parcial y su energía acumulada [5]	7
Fig. 2.6 Inicio de señal según el criterio de la energía acumulada [5]	7
Fig. 2.7 Curva de la energía acumulada y su modificación [5]	7
Fig. 2.8 Inicio de la señal según el criterio de Hinkley [5]	8
Fig. 2.9 Representación de ToA y TDoA [5]	8
Fig. 2.10 Disposiciones de antenas para la localización 2D [5]	11
Fig. 2.11 Disposiciones de antenas para la localización en 3D [5]	11
Fig. 3.1 Opciones de movimiento relativo entre las antenas	13
Fig. 3.2 Representación de las distintas posiciones de las antenas [1]	13
Fig. 3.3 Función periódica obtenida tras medir TDoA [1]	14
Fig. 3.4 Geometría para la expresión analítica de la función periódica [1]	15
Fig. 3.5 Geometría de la localización espacial por dos antenas [1]	16
Fig. 3.6 Representación de los límites de baja y alta frecuencia para la comparación del espectro de dos señales de distinta fuente [1]	19
Fig. 3.7 Mapa de ratios de potencia [1]	19
Fig. 4.1 equivalencia entre el radio y la amplitud de la función periódica	20
Fig. 4.2 Estructura brazo-mástil (Modelo 1)	22
Fig. 4.3 Base (Modelo 1)	22
Fig. 4.4 Motor con tornillos (Modelo 1)	23
Fig. 4.5 Montaje de Motor en la base (Modelo 1)	23
Fig. 4.6 Mecanismo de transmisión (Modelo 1)	23
Fig. 4.7 Montaje de cables en Modelo 1	24
Fig. 4.8 Conjunto Modelo 1 (I)	24
Fig. 4.9 Conjunto Modelo 1 (II)	24
Fig. 4.10 conjunto Modelo 1 (III)	24
Fig. 4.11 Estructura base-mástil (Modelo 2)	25
Fig. 4.12 Brazo (Modelo 2)	25
Fig. 4.13 Modelo 2	25
Fig. 4.14 Poleas y correa dentadas con relación de transmisión $i \neq 1$ [24]	26
Fig. 4.15 Puente motor (Modelo 2)	26
Fig. 4.16 Montaje del motor sobre la estructura del mástil (Modelo 2)	26
Fig. 4.17 engranaje con relación de transmisión $I \neq 1$ [25]	27
Fig. 4.18 Montaje de casquillos sobre el mástil (Modelo 2)	28
Fig. 4.19 Sección a la mitad del Modelo 2 con casquillos	28
Fig. 4.20 Componentes de un rodamiento [26]	28
Fig. 4.21 Sección a la mitad del Modelo 2 con rodamientos	29
Fig. 4.22 Conjunto Modelo 2 (I)	30
Fig. 4.23 Conjunto Modelo 2 (II)	30

Fig. 4.24 Conjunto Modelo 2 (III).....	30
Fig. 4.25 Montaje de cables en Modelo 2	31
Fig. 4.26 Partes móviles del Modelo 1 (izq.) y del Modelo 2 (dcha.).....	31
Fig. 4.27 Modelo final con montaje electrónico a la derecha.....	32
Fig. 4.28 Pieza T con salida de cables de las antenas.....	33
Fig. 4.29 Instalación de la Antena 1 (izq.) y Antena 2 (dcha.) en la estructura	34
Fig. 5.1 Esquema de bloques de la electrónica de control.....	35
Fig. 5.2 Despiece motor paso a paso	36
Fig. 5.3 Tipos de motor paso a paso [28]	36
Fig. 5.4 Curva del par motor de retención (NEMA23) [29].....	37
Fig. 5.5 Respuesta de una bobina bajo voltaje [32].....	39
Fig. 5.6 Intensidad en full-step (izq.) y half- step (dcha.) del A4899 [34].....	39
Fig. 5.7 Esquema de conectividad driver DRV8825 [35]	40
Fig. 5.8 Bloques placa de desarrollo	42
Fig. 5.9 Diagrama de bloques funcionales ESP8266 [40].....	43
Fig. 5.10 Módulo ESP-12E	43
Fig. 5.11 Placa NodeMCU	43
Fig. 5.12 Led y pulsadores del NodeMCU	44
Fig. 5.13 Pineado de la placa NodeMCU	45
Fig. 5.14 Comparación de nomenclatura de los pines digitales de la placa	46
Fig. 5.15 Señal de avance	50
Fig. 5.16 Pantalla inicial e icono de la aplicación MIT AI2 Companion.....	52
Fig. 5.17 Pantalla e icono de la aplicación Motor Spin Controller	52
Fig. 5.18 Mensaje de alerta.....	54
Fig. 5.19 Mensaje de funcionamiento y de respuesta.....	55
Fig. 5.20 Esquema del circuito electrónico (Full step).....	56
Fig. 6.1 Coordenadas de la fuente respecto a la posición inicial de las antenas (0°) en los planos XY (izq.) y XZ (dcha.).....	58
Fig. 6.2 Fuente de descargas parciales	58
Fig. 6.3 display del osciloscopio tras obtener las 50 medidas de DP en 0°	59
Fig. 6.4 Representación del ajuste por Matlab	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Requisitos del mecanismo	22
Tabla 4.2 Lista de componentes MODELO 1	23
Tabla 4.3 Lista de componentes MODELO 2	30
Tabla 5.1 Características NEMA23	37
Tabla 5.2 Características Driver DRV8825	40
Tabla 5.3 Configuraciones de Microstepping [33]	41
Tabla 6.1 Datos de medida para la localización	59
Tabla 6.2 Resultados de TDoA para cada posición angular	61
Tabla 6.3 Resultado del ajuste: coordenadas de la fuente	62
Tabla 6.4 Error obtenido en la localización	62
Tabla 8.1 Costes Totales del TFG	66
Tabla 8.2 Costes de Recursos Humanos	66
Tabla 8.3 Costes de material	67

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La norma IEC TS 62478 [2], llamada *Técnicas de ensayo en alta tensión: Medidas de descargas parciales por métodos electromagnéticos y acústicos*, define las descargas parciales como “fenómenos físicos complejos que consisten en una descarga eléctrica localizada causada por la ruptura parcial de un medio aislante bajo la influencia de la tensión del campo eléctrico local”. Estas descargas parciales se pueden dar en la unión del dieléctrico-conductor o en defectos del propio dieléctrico. Las DP producen pulsos de corriente cuyas propiedades dependen del tipo de descarga, tipo de defecto en el material dieléctrico y de su geometría. Midiendo estos impulsos de corriente se puede localizar la fuente emisora de las DP. Este escrito está enfocado en la localización de DP en un aparato o instalación eléctrica de alta tensión como medida de prevención. Inicialmente, el estudio de la calidad del aislamiento de un aparato o instalación eléctrica se basaba en la medición del factor de pérdidas dieléctricas [3]. Este estudio evolucionó en la medición y localización de DP debido al uso extendido de materiales sintéticos en los aislamientos, los cuales tienen un factor de pérdidas dieléctricas muy bajo. El diagnóstico y la localización de DP en una instalación eléctrica aporta información sobre el estado del aislamiento y su envejecimiento, además de permitir la estimación de su vida útil [4].

El objetivo principal de este trabajo es diseñar, automatizar y controlar remotamente un soporte para las dos antenas del novedoso método de localización espacial de fuentes de descargas parciales. El conjunto de requisitos del soporte está sujeto al método de localización mencionado, pero su función principal es hacer girar una antena respecto a la otra añadiendo una diferencia entre la cota vertical de las antenas. La automatización del soporte tiene dos motivaciones principales. La primera de ellas es aportar precisión angular en el movimiento de las antenas ya que la localización de DP con dos antenas móviles depende directamente de la posición de las mismas. Por otra parte, la localización de DP está dirigida a aparatos o instalaciones eléctricas de alta tensión por lo que el control remoto del movimiento garantiza la seguridad del operario que realiza las mediciones.

A continuación, se comenta brevemente el contenido de cada capítulo. El capítulo 2 describe el método de localización de DP por cuatro antenas, mientras que el capítulo 3 explica el método de localización por dos antenas [1]. El capítulo 4 habla del diseño del

soporte y de los modelos previos a la resolución final. La automatización de dicho soporte mediante un circuito electrónico de control se describe en el capítulo 5. El ensayo de laboratorio donde se localiza una fuente de descargas parciales con el soporte fabricado está recogido en el capítulo 6. Por último, el marco regulador, el entorno socioeconómico y las conclusiones del trabajo se encuentran respectivamente en los capítulos 7, 8 y 9.

CAPÍTULO II: LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

El contenido de este apartado es un extracto elaborado a partir de la tesis doctoral *Classification and Localization of Electromagnetic and Ultrasonic Pulsed Emitters* por José Manuel Fresno de Marcos. La referencia completa del documento se encuentra en la bibliografía [5].

Una descarga parcial o DP es un fenómeno de rotura eléctrica que se da en una región de un medio aislante situado entre dos conductores con diferente potencial. Las DP emiten señales con forma de pulso y es un fenómeno totalmente estocástico [6]. La localización de las descargas parciales permite conocer los equipos de una subestación o la parte del aislamiento de un transformador en los que se están produciendo dichas descargas. Este hecho es de crucial importancia en instalaciones de alta tensión, como transformadores de potencia o subestaciones, donde los equipos y sus aislamientos sufren un alto estrés debido a las condiciones de funcionamiento [7]. Existen varios métodos para la medición de descargas parciales, el más común es el método eléctrico recogido en la norma IEC 60270 [8], llamada *Técnicas de ensayo en alta tensión: Medidas de las descargas parciales*, aunque existen otros métodos como el acústico o el electromagnético recogidos en la norma IEC TS 62478 [2] ya mencionada en la introducción. Este trabajo se centra en el estudio del método electromagnético para la medición de las DP. A continuación, se explicarán los distintos algoritmos de localización de las descargas basados en las medidas electromagnéticas de las mismas.

2.1. Algoritmos de localización

Existen varias técnicas para localizar fuentes emisoras tanto en interiores como al aire libre y se pueden clasificar en algoritmos de proximidad, de intensidad de la señal recibida y de multilateración. Los algoritmos de proximidad necesitan una red densa de antenas, lo que incrementa el coste y dificulta la implementación. Los algoritmos basados en la intensidad de la señal recibida necesitan un estudio previo del espacio. Se colocan los sensores o antenas formando una red, se realizan medidas cambiando la posición de una fuente emisora conocida y, por último, manteniendo la posición de los sensores se toman medidas de la fuente desconocida que, por similitud con las medidas previas, se estima

su posición. Este método en ocasiones obliga a tomar las medidas dejando la instalación o el equipo a diagnosticar fuera de servicio [1]. Por último, los algoritmos de multilateración consisten en la resolución de un sistema de ecuaciones no lineal que define la posición de la fuente, son fáciles de implementar por su bajo número de sensores y no requieren que la instalación o equipo esté fuera de servicio, por ello se han considerado adecuados para la localización de descargas parciales.

Las medidas de DP por método electromagnético para la localización por multilateración se realiza mediante al menos tres o cuatro antenas [9], dependiendo si la localización se hace en el plano (2D) o en el espacio (3D) respectivamente. Las antenas son omnidireccionales y se colocan en posiciones determinadas. La disposición de estos sensores es crucial para la precisión del resultado final. Cuando se produce una descarga parcial, las antenas la reciben en forma de pulso al cabo de un determinado tiempo llamado tiempo de llegada, ToA (del inglés: *time of arrival*). Estas antenas están conectadas con cables coaxiales a un osciloscopio de cuatro canales capaz de medir las cuatro señales recibidas. Una vez tomadas las medidas, hay distintos algoritmos de multilateración que permiten conocer la posición de la fuente usando como datos de entrada la posición de las antenas y la diferencia de tiempo de llegada, TDoA (del inglés: *time difference of arrival*).

Los algoritmos de resolución del sistema de ecuaciones pueden clasificarse en iterativos o no iterativos, teniendo siempre como entrada la posición de las antenas y la diferencia de tiempos de llegada, TDoA. En el primer grupo se incluyen algoritmos como mínimos cuadrados estándar o hiperbólicos, que se basan en la técnica de optimización Newton-Raphson [10]. Otros algoritmos iterativos son el algoritmo genético, GA, y el de optimización de enjambre de partículas, PSO, que se basan en técnicas metaheurísticas. Por otro lado, los algoritmos no iterativos son utilizados comúnmente en la localización GPS y algunos de ellos son el posicionamiento hiperbólico [11], estimación de máxima probabilidad [12], y el algoritmo de Bancroft [13]. Sin embargo, los algoritmos de multilateración no siempre localizan la fuente con precisión. Los algoritmos iterativos no siempre convergen hacia una solución y además dependen de los valores iniciales que se elijan para las iteraciones. Por otro lado, los algoritmos no iterativos utilizan polinomios de segundo grado que aportan directamente dos soluciones, una positiva y otra negativa, siendo ambas posibles, aunque sólo una de ellas es realmente la más cercana a la posición de la fuente. Un análisis comparativo de los algoritmos nombrados [5] en condiciones

ideales, es decir, sin tener en cuenta los errores debido a la toma de datos, demuestra que el que aporta una solución más próxima a la real es el algoritmo PSO con un 90.8% de exactitud en radio, un 93.6% en el ángulo θ y un 95.7% en el ángulo φ (según coordenadas esféricas de la figura 2.1).

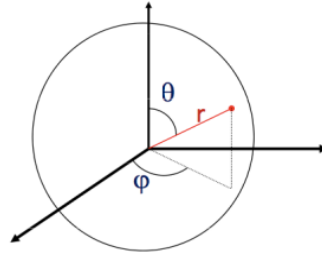


FIG. 2.1 COORDENADAS ESFÉRICAS [14]

2.2. Tiempo de llegada, ToA

El ToA es el tiempo que tarda la onda de radiofrecuencia en llegar a la antena desde la fuente emisora. Ese tiempo está directamente relacionado con la distancia de separación entre la fuente y la antena a través de la velocidad de propagación de dicha onda en el medio. Se asume que la velocidad de propagación de este tipo de ondas es igual a la velocidad de la luz. En la ecuación (2.1), d_i representa la distancia de la antena i a la fuente, v es la velocidad de propagación en el medio, y t_i es el tiempo que tarda en recorrer la distancia de separación entre la fuente y la antena i .

$$d_i = v \cdot t_i \quad (2.1)$$

Para definir ToA hay que conocer el inicio de la señal. En un entorno ideal, el pulso tendría un inicio exacto, pero en entornos reales la señal se distorsiona debido al ruido y las interferencias del camino. Esto hace que aparezcan oscilaciones en la señal recibida y por tanto no queda claro cuál es el inicio exacto del pulso. Para determinar el inicio de la señal existen distintos criterios. El criterio del valor máximo (figura 2.2) sitúa el inicio de la señal en el momento que se alcanza su valor máximo [15]. Es el criterio más directo y sería preciso en entornos ideales donde el pulso es instantáneo, pero en la realidad su precisión depende del tiempo de subida del frente de onda de la emisión y del cambio de la pendiente en la propagación del medio. El criterio del valor umbral (figura 2.3) define como inicio de la señal el momento en que esta supera el valor umbral por primera vez [16]. Ese valor umbral es definido como un porcentaje del valor máximo que alcanza la

señal. Este criterio puede situar el inicio de la señal erróneamente debido al ruido previo. Para evitar ese hecho, el criterio de la pendiente umbral (figura 2.4), fija el inicio de la señal en la intersección entre el eje temporal y una recta tangente a la curva en el punto donde se alcanza el valor umbral [16].

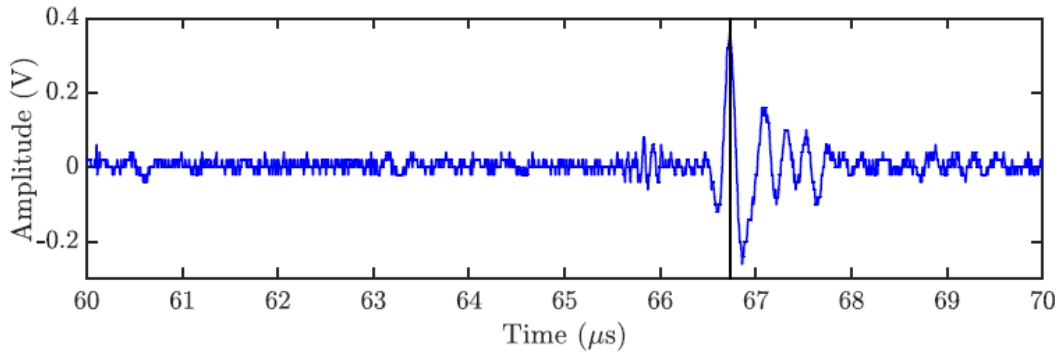


FIG. 2.2 INICIO DE LA SEÑAL SEGÚN EL CRITERIO DEL MÁXIMO VALOR [5]

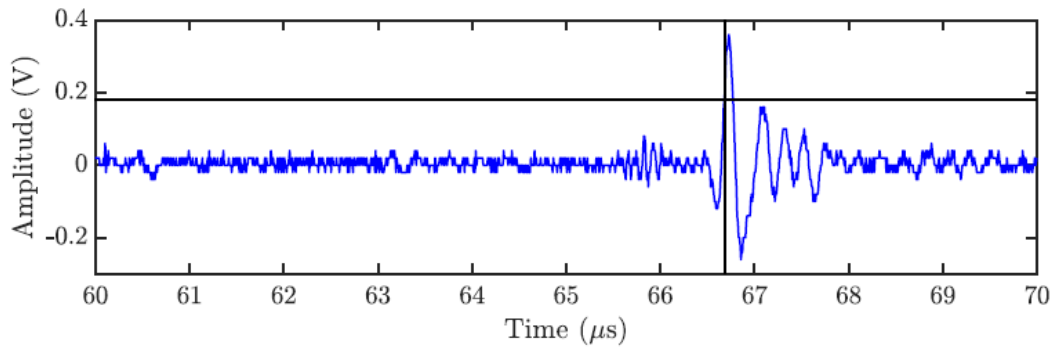


FIG. 2.3 INICIO DE LA SEÑAL SEGÚN EL CRITERIO DEL VALOR UMBRAL [5]

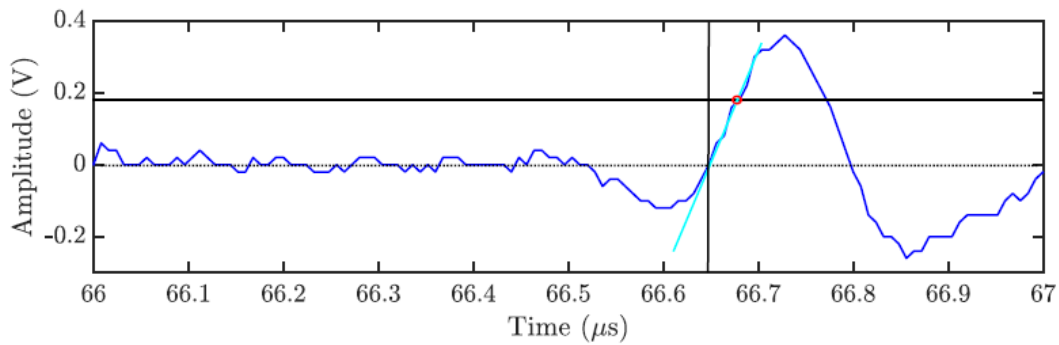


FIG. 2.4 INICIO DE LA SEÑAL SEGÚN EL CRITERIO DE LA PENDIENTE UMBRAL [5]

Otros criterios menos directos pero con mayor precisión son el criterio de máxima derivada de la energía acumulada (figuras 2.5 y 2.6) y el criterio de Hinkley (figuras 2.7 y 2.8). El primero de ellos sitúa el inicio de la señal, como su nombre indica, en la máxima derivada de la energía acumulada [17]. En la figura 2.5 están representada en azul la señal y en rojo la energía acumulada. En la figura 2.6 está representada de nuevo la energía

acumulada en azul, su derivada en rojo, y el inicio de la señal con una barra vertical negra donde se alcanza el máximo de la derivada. El criterio de Hinkley modifica la gráfica de la energía acumulada restándole la recta que une el punto inicial y el final de esa curva, y sitúa el inicio de la señal en el punto mínimo de la función resultante [18]. En la figura 2.7 se muestra en rojo la curva de la energía acumulada, en verde la recta de la transformación y en azul la curva modificada de la energía acumulada. En la figura 2.8 se muestra la curva obtenida frente a la señal recibida por la antena situando el inicio de esta en el punto mínimo de la curva obtenida.

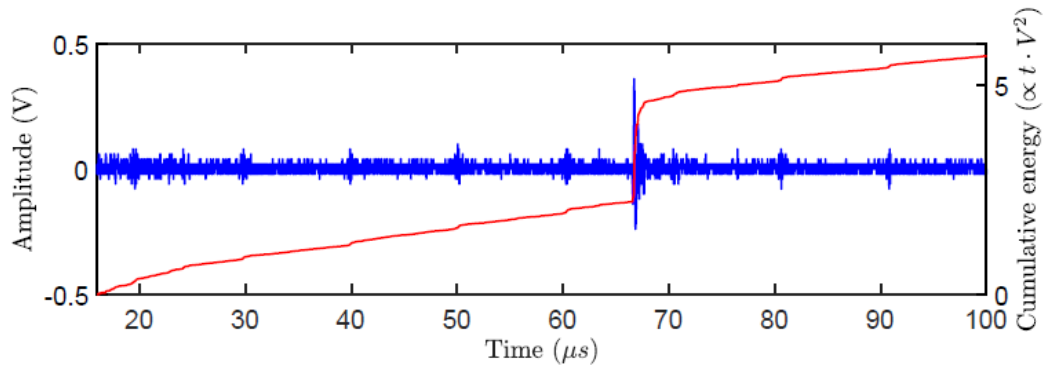


FIG. 2.5 SEÑAL DE DESCARGA PARCIAL Y SU ENERGÍA ACUMULADA [5]

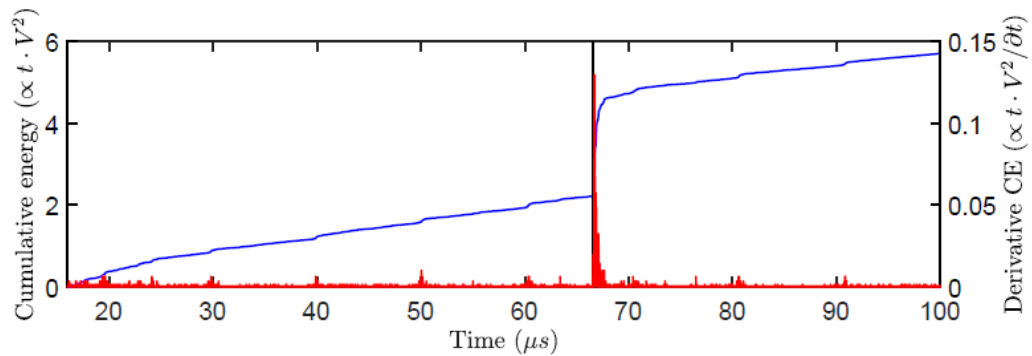


FIG. 2.6 INICIO DE SEÑAL SEGÚN EL CRITERIO DE LA ENERGÍA ACUMULADA [5]

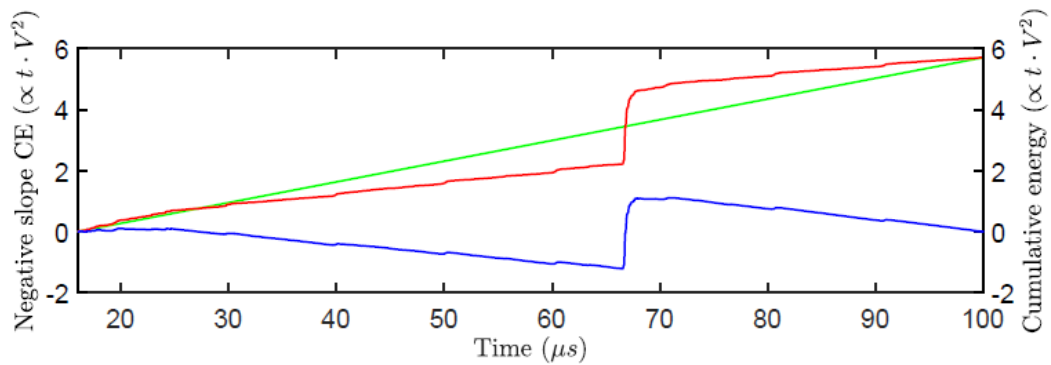


FIG. 2.7 CURVA DE LA ENERGÍA ACUMULADA Y SU MODIFICACIÓN [5]

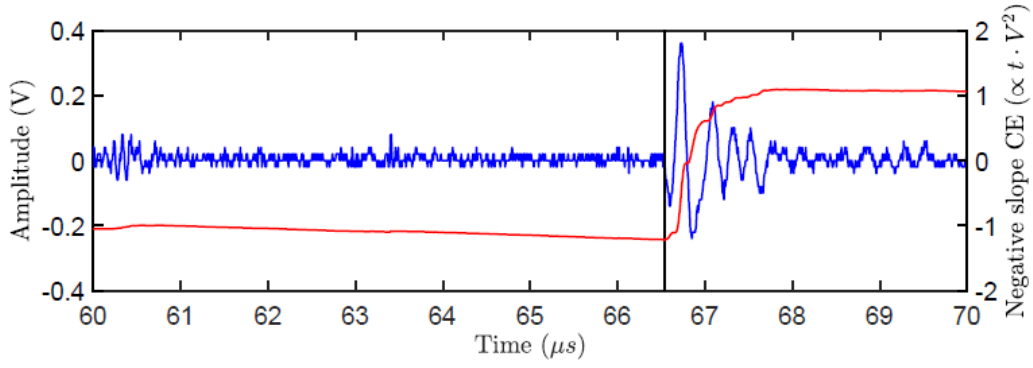


FIG. 2.8 INICIO DE LA SEÑAL SEGÚN EL CRITERIO DE HINKLEY [5]

2.3. Diferencia de tiempos de llegada, TDoA

Cuando la posición de la fuente es desconocida, es imposible calcular el ToA absoluto. Por eso se usa la diferencia de los tiempos de llegada, TDoA, entre distintas antenas. Este es un valor relativo que calcula la diferencia de tiempos de llegada de una antena respecto a la otra. De esta manera la ecuación (2.1) quedaría modificada en la (2.2), donde d_{ij} es la diferencia de las distancias desde la fuente a las antenas i y j , y t_{ij} es la diferencia de los tiempos de llegada.

$$d_{ij} = d_i - d_j = v \cdot t_{ij} \quad (2.2)$$

La correlación cruzada [19] es uno de los métodos comunes para determinar diferencia de tiempos, t_{ij} , entre dos señales. Sin embargo, el resultado de este método es muy sensible a entornos que presentan ruido y otras distorsiones debidas a las interferencias en el camino de la señal. Por ello se ha optado por medir directamente la diferencia de ToA de cada antena. Una vez recibidas las señales, se define el inicio del pulso para cada una de ellas y se calcula el desplazamiento en el eje horizontal de una respecto a la otra, es decir, la diferencia de tiempo entre los dos inicios obteniendo así el valor de TDoA y eliminando los ToA que son desconocidos.

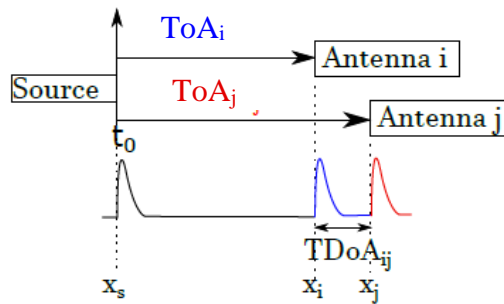


FIG. 2.9 REPRESENTACIÓN DE TOA Y TDOA [5]

Gracias a la ecuación (2.2) que relaciona la distancia y el tiempo entre fuente y antena, se puede expresar TDoA y ToA en unidad de tiempo (segundos) o en unidad de longitud (metros) indistintamente. Hay una tercera opción adimensional debido a que los aparatos de medida no recogen una señal continua sino que la muestrean, entonces las magnitudes TDoA y ToA se pueden expresar también en muestras. Para hacer la conversión entre muestra y unidad de tiempo basta con conocer el período de muestreo, T_s , del equipo utilizado que, multiplicado por el número de muestras n se obtiene la equivalencia en unidad de tiempo.

$$t_{ij} = T_s \cdot n \quad (2.3)$$

2.4. Errores en la localización de fuentes

Los resultados obtenidos en el método multilateracional con cuatro antenas en la localización de fuentes no son exactos. Esta imprecisión es el resultado de una serie de errores debido a distintos factores. La naturaleza de la señal, las características de las antenas o la precisión de los equipos de medida son las principales causas de estos errores.

Hay varios aspectos de la naturaleza de la señal que afectan a la determinación del inicio del pulso, como son la pendiente de subida del pulso, las perturbaciones que pueda haber en el entorno y la propagación multidireccional. La descarga parcial es un evento aleatorio por naturaleza ya que la intensidad de la descarga y la trayectoria que sigue cambian en cada evento [20]. Esto implica que los parámetros del pulso no son constantes en cada descarga y por esta razón, es necesario recoger un amplio número de muestras que se modelan como un proceso estocástico. Por otro lado, los entornos en los que se realizan las medidas de localización pueden presentar ruido en todo el espectro de radiofrecuencia. Para minimizar el error debido al ruido existen métodos que separan distintos tipos de señal, como por ejemplo los mapas de ratios de potencia [21, 1]. Por último, otra causa que aporta incertidumbre en la medida de la señal es la presencia de obstáculos que producen la reflexión de la señal. Esto significa que la presencia de objetos metálicos entre la fuente y la antena distorsiona la señal recibida ya que la pendiente de subida no sería tan rápida como la original.

Por otro lado, los aparatos de instrumentación realizan una medida digital muestreando la señal recibida con una frecuencia determinada. Si los valores de TDoA fueran inferiores al tiempo de muestreo del equipo, esa información sería inapreciable. Por ello,

los osciloscopios utilizados deben tener una velocidad alta de muestreo ya que las descargas parciales pueden tener tiempos de subida del orden de 10^{-10} segundos. Para reducir artificialmente la pérdida de información por el muestreo se pueden recurrir a la interpolación.

También, la disposición geométrica y radiométrica de las antenas es de gran importancia para obtener un menor error. A pesar de que las antenas sean omnidireccionales, si la fuente se encontrara por debajo del plano horizontal de la antena, la pendiente de subida de la señal recibida sería más lenta aportando así una distorsión del pulso emitido en la descarga. Además, la posición de las antenas debe ser precisa y exacta para obtener una buena medida de TDoA porque una pequeña imprecisión en la posición de las antenas supone una gran dispersión en los resultados finales. También es importante la disposición de las antenas que influye de forma muy significativa en la precisión de la localización. Un estudio [5] demuestra que para localización en 2D es mejor la disposición trapezoidal frente a la cuadrada y la de estrella, ver figura 2.10, aunque dicha disposición tenga como puntos débiles los ángulos 0° y 90° . Ese mismo estudio demuestra para la localización 3D que la mejor disposición es la cuadrada comparada con las disposiciones piramidal, cartesiana y trapezoidal, ver figura 2.11, aunque las dos últimas también aporten buenos resultados en precisión.

A los errores anteriores hay que añadir la falta de precisión de los criterios de determinación del inicio de la señal y de los algoritmos de localización. Hay un estudio [5] similar al comentado en el apartado 2.1, en el que compara de nuevo la precisión de los distintos algoritmos de localización, pero esta vez teniendo en cuenta los errores del proceso. Los resultados vuelven a indicar el algoritmo PSO como el más preciso con un 49.2% de exactitud en radio, un 93.6% en el ángulo θ y un 97.1% en el ángulo φ (según coordenadas esféricas de la figura 2.9). Los resultados de este estudio muestran que teniendo en cuenta las incertidumbres comentadas, la precisión en la localización de una fuente emisora sigue siendo elevada respecto a la dirección (ángulos), aunque la precisión en la distancia (radio) desciende considerablemente.

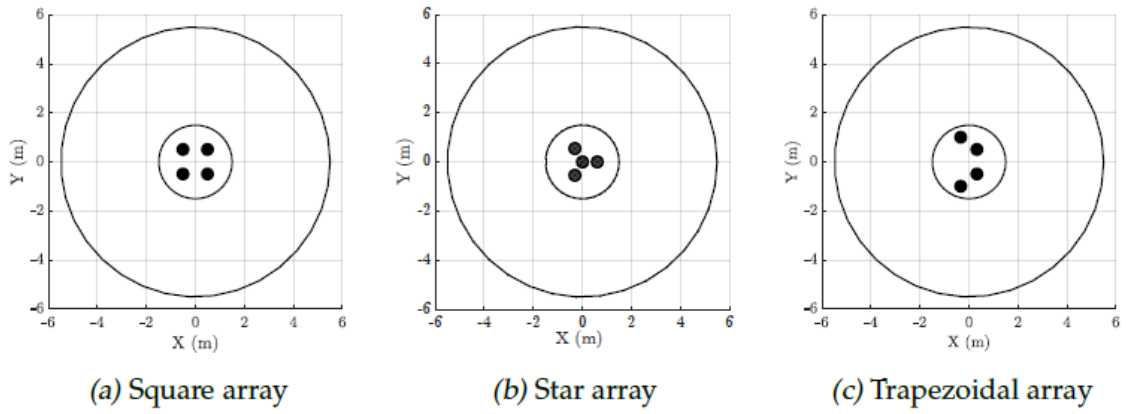


FIG. 2.10 DISPOSICIONES DE ANTENAS PARA LA LOCALIZACIÓN 2D [5]

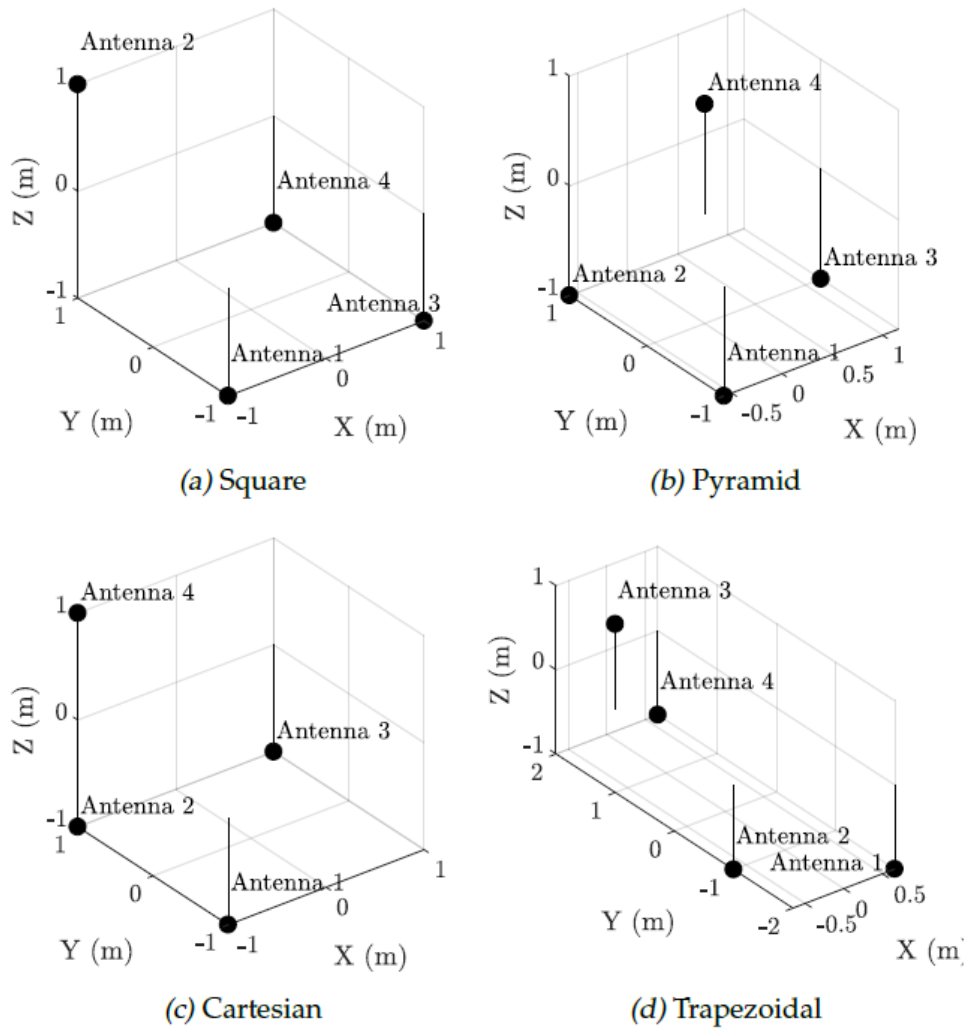


FIG. 2.11 DISPOSICIONES DE ANTENAS PARA LA LOCALIZACIÓN EN 3D [5]

CAPÍTULO III: LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES CON DOS ANTENAS

El objetivo de este trabajo es diseñar y automatizar un mecanismo para llevar a cabo la localización de descargas parciales con dos antenas. Este método fue propuesto en los artículos *Planar Localization of Radio-Frequency or Acoustic Sources with Two Receivers* [22] y *Radio-frequency localization of multiple partial discharges sources with two receivers* [1], de los cuales se ha extraído la mayor parte de la información para este apartado.

El método de localización con dos antenas es válido tanto para emisiones acústicas como electromagnéticas en los rangos VHF y UHF, aunque este estudio se centra en la determinación de fuentes de descargas parciales en un aislamiento eléctrico para el mantenimiento de cualquier equipo o instalación eléctrica. El método de localización por algoritmos de multilateración descrito en el capítulo 2 que necesitaba al menos tres o cuatro antenas, es mejorado por esta propuesta reduciendo el número de sensores a dos. Esto es posible gracias a la relación geométrica de las antenas y su movimiento relativo que permite obtener un número suficiente de diferencia de tiempos de llegada, TDoA, para localizar la fuente mediante una expresión geométrica que relaciona la distancia entre las antenas, el ángulo de rotación y las TDoA obtenidos en cada posición.

3.1. Localización en el plano

La clave de la localización con dos antenas es la relación geométrica entre ellas: la distancia entre los sensores es constante gracias a una barra rígida que los une. Para poder localizar la fuente hay que medir TDoA cambiando la posición de las antenas. Hay dos posibilidades válidas para el movimiento relativo de estas. La opción (a) según la figura 3.1 fija el centro de rotación en el punto medio entre los sensores siendo ambas antenas móviles. En la opción (b) una de las antenas gira alrededor de la otra que queda fija en el centro de rotación. Una diferencia obvia está en el radio de giro, la opción (a) es más compacta teniendo la misma distancia entre antenas. Sin embargo, se ha elegido la opción (b) ya que se facilita los cálculos por haber una antena con coordenadas constantes y

porque tener una antena fija facilita la caracterización de señales con distinto origen, proceso explicado en apartado 3.3.

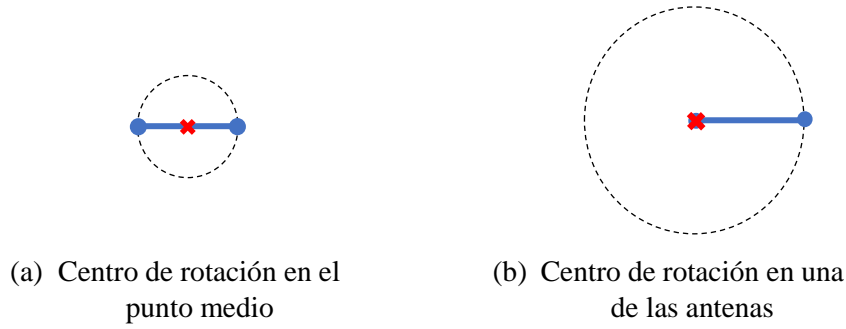


FIG. 3.1 OPCIONES DE MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE LAS ANTENAS

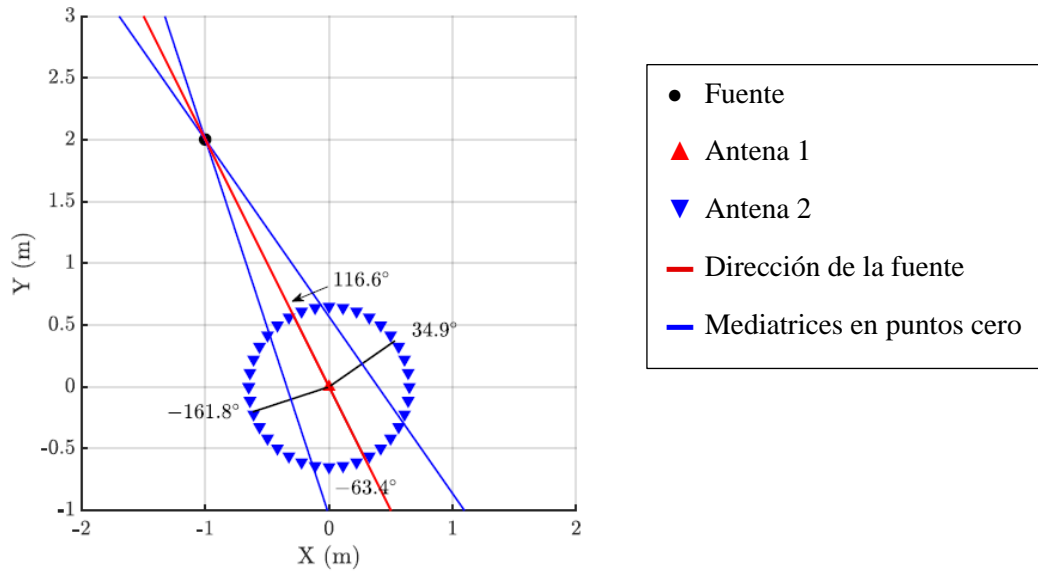


FIG. 3.2 REPRESENTACIÓN DE LAS DISTINTAS POSICIONES DE LAS ANTENAS [1]

Las medidas de las descargas parciales se toman en ángulos discretos a lo largo de una vuelta completa, ver figura 3.2. Para obtener TDoA en cada ángulo hay que determinar el inicio de las dos señales recibidas con cualquiera de los métodos descritos en el apartado 2.2 y calcular su diferencia. Con los valores obtenidos de TDoA se grafica una función periódica como la de la figura 3.3, donde se representa TDoA en muestras frente al ángulo de giro de la antena 2 en grados. La equivalencia de las unidades de TDoA se encuentra en el apartado 2.3. Con esta gráfica hay dos maneras de localizar la posición de la fuente: mediante la intersección de mediatrices o mediante la expresión analítica de la función periódica.

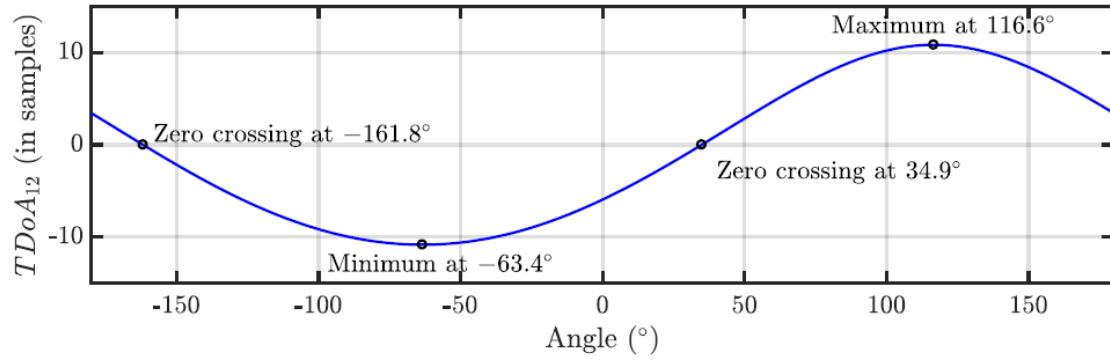


FIG. 3.3 FUNCIÓN PERIÓDICA OBTENIDA TRAS MEDIR TDoA [1]

3.1.1. Intersección de mediatrices

Hay cuatro puntos significativos en la función obtenida de TDoA, figura 3.3: dos pasos por cero, el punto máximo y el punto mínimo. Los valores máximo y mínimo de TDoA se alcanzan cuando las antenas están alineadas con la fuente. En la figura 3.2 el punto máximo está a el ángulo 116.6° siendo el alineamiento *fuentes-antena 2-antena 1*, por lo que TDoA es positivo, $t_1 > t_2$. El punto mínimo se localiza en el ángulo -63.4° siendo el orden de las antenas contrario, *fuentes-antena 1-antena 2*, obteniendo un TDoA negativo, $t_1 < t_2$. Localizando estos dos últimos puntos se conoce la orientación de la fuente (representada en rojo en la figura 3.2) pero no la distancia al origen de coordenadas. Hay dos puntos de la circunferencia en los que TDoA tiene valor cero, $t_1 = t_2 = 0$. Esto significa que ambas antenas están a la misma distancia de la fuente, es decir la fuente se encuentra en la mediatriz de las antenas. En la figura 3.2 estos puntos quedan en los ángulos 34.9° y -161.8° . Calculando la intersección de las dos mediatrices (representadas en azul) se define la posición de la fuente.

Al ser medidas discretas es muy difícil que una de las muestras coincida con el valor exacto donde TDoA vale cero. Por ello, se interpolan las muestras con valores inmediatamente por encima y por debajo de cero. Una vez localizados los puntos cero, se halla la intersección de sus mediatrices para obtener la posición de la fuente.

3.1.2. Expresión analítica de la función periódica

Este método consiste en obtener una expresión analítica para una función periódica que relaciona los valores medidos de TDoA con las posiciones de la fuente y las antenas. La geometría del problema está representada en la figura 3.4. Tomando TDoA en metros se puede igualar a la diferencia geométrica de las distancias entre la fuente y las antenas, d_1

y d_2 , obteniendo así la expresión buscada, ecuación (3.3). A continuación, se muestran las coordenadas de la posición de la fuente y la antena 2. Estos puntos son los que definen el vector $\overrightarrow{d_2}$ de la ecuación (3.1).

$$\begin{aligned} P_s &= (x_s, y_s) = (d_1 \cos \alpha, d_1 \sin \alpha) \\ P_2 &= (x_2, y_2) = (r \cos \theta, r \sin \theta) \\ \overrightarrow{d_2} &= P_s - P_2 = (d_1 \cos \alpha - r \cos \theta, d_1 \sin \alpha - r \sin \theta) \end{aligned} \quad (3.1)$$

La distancia d_2 se obtiene con la raíz cuadrada del vector, y con esa expresión ya se puede obtener TDoA como la diferencia de distancias:

$$\begin{aligned} TDoA &= d = d_1 - d_2 \\ d &= d_1 - \sqrt{(d_1 \cos \alpha - r \cos \theta)^2 + (d_1 \sin \alpha - r \sin \theta)^2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Operando y reagrupando términos se obtiene la expresión analítica final, ecuación (3.3), donde d es TDoA obtenida experimentalmente; r y θ son conocidos y equivalen al radio y al ángulo de la antena 2 respectivamente; y por último d_1 y α son las incógnitas que determinan la posición de la fuente.

$$d = d_1 - \sqrt{r^2 + d_1^2 - 2rd_1 \cos(\alpha - \theta)} \quad (3.3)$$

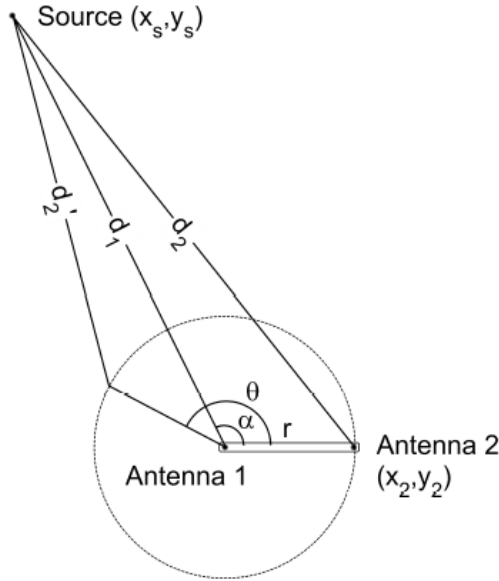


FIG. 3.4 GEOMETRÍA PARA LA EXPRESIÓN ANALÍTICA DE LA FUNCIÓN PERIÓDICA [1]

La ecuación (3.3) está expresada en coordenadas polares, pero se puede enunciar de forma equivalente en coordenadas cartesianas:

$$d = \sqrt{x_s^2 + y_s^2} - \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2} \quad (3.4)$$

En resumen, tras haber obtenido la función de la figura 3.3, hay que encontrar la expresión analítica que mejor se ajuste a dicha función. La expresión analítica obtenida será equivalente a la ecuación (3.3) o (3.4) y por comparación de términos se obtienen las incógnitas d_1 y α que determinan la posición de la fuente o en cartesianas, x_s e y_s .

3.2. Localización en el espacio

La localización espacial de descargas parciales se realiza mediante el mismo procedimiento que la localización en el plano modificando únicamente la geometría del problema, ver en figura 3.5. Para poder obtener información sobre el eje Z la antena fija está situada a una altura distinta respecto a la antena móvil.

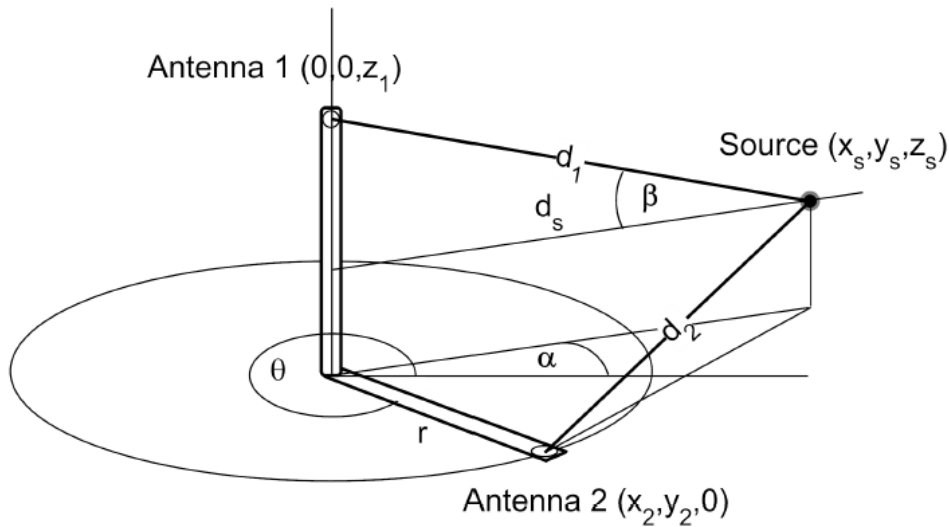


FIG. 3.5 GEOMETRÍA DE LA LOCALIZACIÓN ESPACIAL POR DOS ANTENAS [1]

Los dos métodos de localización planar son aplicables a la localización en el espacio. El método por intersección de mediatrices sigue exactamente el mismo procedimiento, pero el cambio en la geometría implica que la mediatriz de los puntos cero ya no es perpendicular a la barra que une las antenas. Esto complica los cálculos y, además, en un estudio realizado [1] queda demostrado que el método de la intersección de mediatrices tiene un mayor error en comparación al método de la expresión analítica. Este segundo método tiene el mismo concepto que la localización en 2D. Considerando TDoA en

metros, puede igualarse a la diferencia de distancias entre la fuente y las antenas, d_1 y d_2 , obteniendo así la expresión analítica buscada. A continuación, se muestran las coordenadas de la fuente y las antenas, y los vectores \vec{d}_1 y \vec{d}_2 :

$$\begin{aligned}
P_s &= (x_s, y_s, z_s) = (d_s \cos \alpha, d_s \sin \alpha, z_s) \\
P_1 &= (x_1, y_1, z_1) = (0, 0, z_1) \\
P_2 &= (x_2, y_2, z_2) = (r \cos \theta, r \sin \theta, 0) \\
\vec{d}_1 &= (d_s \cos \alpha, d_s \sin \alpha, z_s - z_1) \\
\vec{d}_2 &= (d_s \cos \alpha - r \cos \theta, d_s \sin \alpha - r \sin \theta, z_s)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Igualando TDoA a la diferencia del módulo de estos dos vectores se llega a la expresión analítica genérica.

$$d = d_1 - \sqrt{(d_s \cos \alpha - r \cos \theta)^2 + (d_s \sin \alpha - r \sin \theta)^2 + z_s^2} \tag{3.6}$$

Que operando y reagrupando términos se obtiene la expresión definitiva,

$$d = d_1 - \sqrt{d_s^2 + r^2 + z_s^2 - 2rd_s \cos(\alpha - \theta)} \tag{3.7}$$

En la ecuación (3.7) aparecen tres incógnitas a determinar: d_1 , α , z_s . Los demás parámetros son conocidos: d representa TDoA en cada posición, r y θ representan la posición de la antena 2, y d_s está relacionado con d_1 a través de la ecuación (3.10). Esta ecuación deriva del módulo del vector \vec{d}_1 , ecuación (3.8) simplificada en la ecuación (3.9).

$$d_1 = \sqrt{(d_s \cos \alpha)^2 + (d_s \sin \alpha)^2 + (z_s - z_1)^2} \tag{3.8}$$

$$d_1 = \sqrt{d_s^2 + z_s^2 + z_1^2 - 2z_s z_1} \tag{3.9}$$

$$d_s = \sqrt{d_1^2 - z_s^2 - z_1^2 + 2z_s z_1} \tag{3.10}$$

La ecuación (3.7) está en coordenadas esféricas, pero se puede expresar también en coordenadas cartesianas, ecuación (3.11), donde se ha tenido en cuenta que por la geometría del problema $x_1 = y_1 = z_2 = 0$.

$$d = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + (z_s - z_1)^2} - \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + z_s^2} \quad (3.11)$$

Una vez obtenida la expresión analítica general, tanto en polares como en cartesianas, el procedimiento para obtener las incógnitas que determinan la posición de la fuente es exactamente igual a la localización en el plano explicado en el apartado 3.1.2.

3.3. Separación y localización de dos o más fuentes

Cuando se realizan medidas en una instalación real se desconoce la posición y el número de los puntos donde se producen las descargas parciales. Si las medidas obtenidas de TDoA se analizaran y estudiaran asumiendo que solo hay una única fuente y en realidad hubiese más, se obtendrían resultados erróneos. Por ello la distinción del origen de las descargas parciales es de gran importancia. La técnica propuesta en [1] basa la separación de las señales en la forma del pulso obtenido a través de la densidad espectral de la potencia. La forma de la señal recibida depende de la señal de origen emitida, de la trayectoria desde la fuente hasta el sensor, de las características de la antena y de las interferencias. Las características de las antenas y las interferencias pueden considerarse constantes por lo que, si no se modifica la trayectoria de la señal, el único factor que varía la forma del pulso recibido es el origen de dicha señal. Esto implica necesariamente que una de las dos antenas sea estacionaria corroborando la elección de colocar el centro de rotación en una de las antenas, opción (b) de la figura 3.1. Una vez identificadas las distintas fuentes, las medidas asociadas a ellas se analizan por separado. De esta manera con sólo dos antenas se puede caracterizar el origen de la señal y localizarlo: de la antena 1 (fija) se obtiene la información necesaria para distinguir el origen de la señal y la antena 2 (móvil) aporta las medidas de TDoA necesarias para la localización.

La comparación y distinción de las señales por su forma se realiza mediante el mapa de ratios de potencia que estudia la densidad espectral en aquellas bandas de frecuencia donde el espectro de la señal es diferente [23]. En este mapa se representan los ratios de alta frecuencia frente a los de baja frecuencia. Los intervalos de frecuencia deben seleccionarse de tal manera que las señales tengan un espectro diferenciable entre sí, para que en la representación del mapa se aprecien agrupaciones claras de puntos correspondientes a los distintos orígenes. Así, los límites de los intervalos se calculan maximizando la distancia entre los centroides de dichas agrupaciones. En el estudio realizado en [1], el método para optimizar esta distancia de separación es el algoritmo de

optimización del enjambre de partículas. En la figura 3.6 se muestran dos espectros de la densidad de potencia de señales distintas con los límites de la frecuencia obtenidos tras la optimización. Por otro lado, la figura 3.7 es un ejemplo de un mapa de ratios de potencia donde se puede apreciar claramente las agrupaciones de puntos correspondientes a dos fuentes distintas, una en color negro y la otra en color gris.

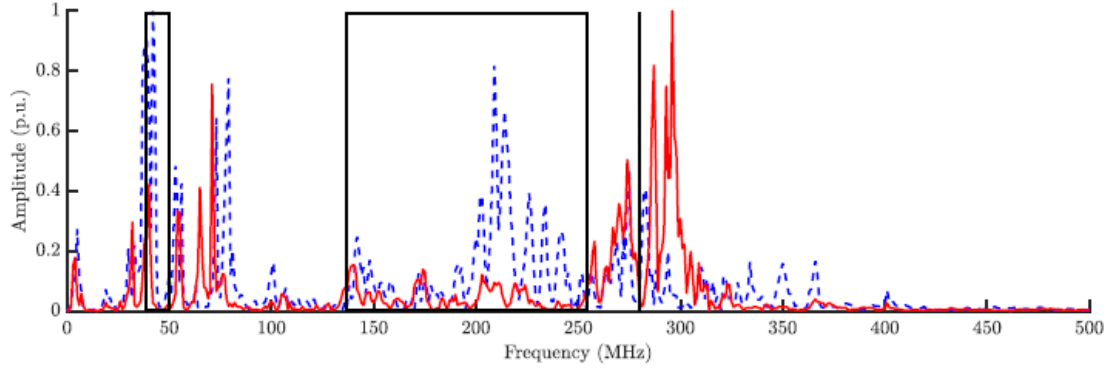


FIG. 3.6 REPRESENTACIÓN DE LOS LÍMITES DE BAJA Y ALTA FRECUENCIA PARA LA COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DOS SEÑALES DE DISTINTA FUENTE [1]

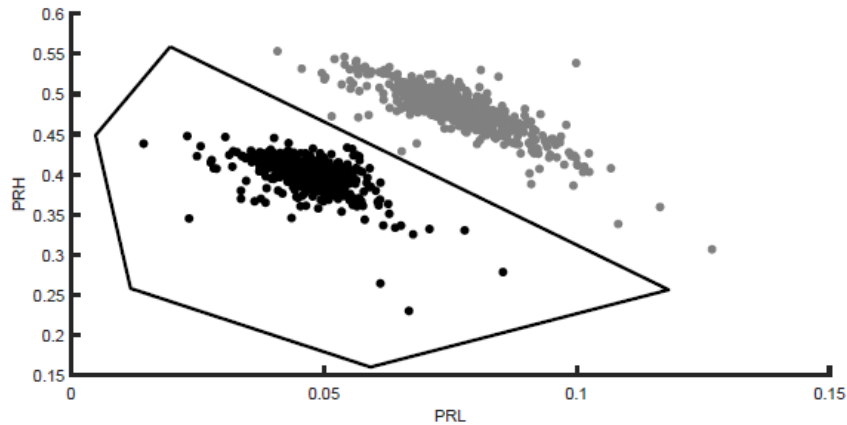


FIG. 3.7 MAPA DE RATIOS DE POTENCIA [1]

En resumen, para caracterizar y localizar distintas fuentes hay que tomar las medidas a lo largo de una vuelta completa manteniendo una antena fija (1) y rotando la otra a su alrededor (2). Primero se analizan las señales recibidas en la antena 1 para la distinción de fuentes y, después, se analizan los pares de señales de antena 1 y 2 para la localización. La localización de las fuentes se realiza por separado estudiando la diferencia de tiempos de llegada, TDoA, entre las dos antenas.

CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SOPORTE

4.1. Especificaciones y requisitos

Para llevar a cabo el método de localización espacial con dos antenas se necesita un soporte que haga rotar una de ellas respecto a la otra teniendo además distintas alturas para obtener información sobre el tercer eje Z. De esta manera, el soporte se compone de tres partes principales: el mástil, el brazo y la base. El mástil es la barra vertical que sujeta la antena 1 fija en el centro de rotación. El brazo es la barra horizontal que sujeta la antena 2 móvil. Y, por último, la base es el apoyo de todo el soporte cuya función es dar estabilidad y rigidez para evitar el vuelco, además en ella se realizará el montaje del motor.

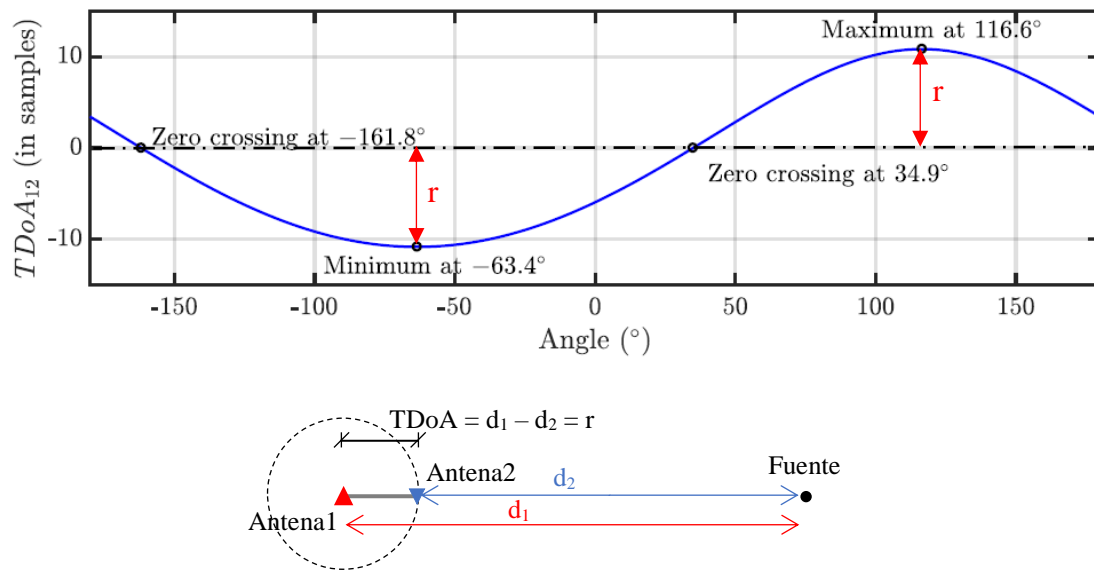


FIG. 4.1 EQUIVALENCIA ENTRE EL RADIO Y LA AMPLITUD DE LA FUNCIÓN PERIÓDICA

Una de las especificaciones a determinar es la distancia entre las antenas, esto es importante ya que la distancia horizontal entre ellas define la resolución de los resultados. Para la localización en 2D, la función periódica obtenida al tomar las medidas a lo largo de una vuelta completa tendrá su máximo y su mínimo en aquellas posiciones en las que la fuente esté alineada con las dos antenas. En esos puntos la diferencia de los tiempos de llegada, TDoA, medida en metros es igual a la distancia entre las antenas, es decir, a la longitud de la barra que las une. Por lo que, la amplitud de la función periódica viene determinada por el radio de la circunferencia descrita por la antena 2, ver figura 4.1.

Entonces, un mayor radio significa una mayor amplitud en la función periódica dando unos resultados más claros, lo que facilita la obtención de la función analítica. Conociendo la equivalencia entre metros, segundos y muestras de TDoA analizada en el apartado 2.3, se puede establecer la relación entre el radio y la amplitud en muestras que se quiere obtener, ver ecuación (4.1) donde n son el número de muestras, v es la velocidad de propagación en el medio y T_s es el tiempo de muestreo del equipo de medida. Para la velocidad de propagación se toma el valor de la velocidad de la luz y el tiempo de muestreo del equipo utilizado son 200 ps.

$$r \geq nvT_s \quad (4.1)$$

Sin embargo, en la localización espacial cambia la geometría respecto a la localización planar. El máximo y mínimo de la función se alcanzan cuando las antenas y la fuente se encuentran en el mismo plano, sin estar alineados. Esto hace que la diferencia de distancias a la fuente, TDoA en metros, sea mayor que la barra de unión entre las antenas ya que TDoA es, en este caso, la diferencia entre las proyecciones de las distancias sobre la horizontal. Esto implica que el máximo valor de TDoA en la localización espacial sea levemente mayor que el radio dependiendo de la lejanía de la fuente. Como conclusión, se ha fijado la longitud de la barra horizontal en 54 cm obteniéndose así una amplitud en la función periódica de 9 muestras aproximadamente. Por otro lado, la distancia vertical no es determinante y se ha escogido 50 cm por ser una longitud apropiada para la estabilidad de la estructura.

Para obtener la función periódica hay que tomar medidas de TDoA cada cierto ángulo recorriendo una vuelta completa, de modo que otro requisito del soporte es que sea capaz de completar al menos los 360° de una revolución. Además, la velocidad de giro será muy baja (mucho menor de 1 rpm) por lo que el mecanismo está libre de fatiga y de desgaste significativo.

El material del soporte debe ser preferentemente no metálico para minimizar las interferencias en la recepción de la señal. Los metales provocan reflexión de las señales modificando su trayectoria, por lo que evitando este tipo de materiales se pueden reducir las interferencias. Además, se necesita un material ligero y rígido para disminuir el par necesario para hacer girar el soporte y para prevenir la flexión del brazo, ya que es una barra estrecha y larga con uno de sus extremos libre.

TABLA 4.1 REQUISITOS DEL SOPORTE

Diferencia cota vertical	500 mm
Diferencia cota horizontal (radio)	540 mm
Velocidad de giro	< 1 rpm
Número de vueltas	≥ 1
Rango de giro	360°
Material	No metálico, ligero y rígido

Un último factor importante a tener en cuenta en el diseño del soporte son los cables que unen las antenas al osciloscopio, ya que al realizar el giro se enrollarían alrededor de la estructura. Entorno a este problema se han propuesto dos modelos diferentes desarrollados en el siguiente apartado, en los que cambian los elementos fijos y móviles.

4.2. Primeros modelos y su evolución

4.2.1. MODELO 1

La característica principal del Modelo 1 es el giro solidario del brazo y el mástil que forman una estructura rígida, mientras que la base permanece fija.

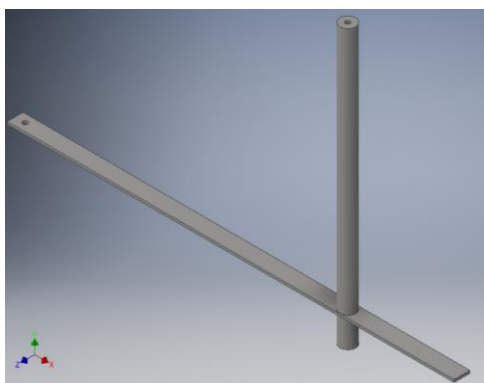


FIG. 4.2 ESTRUCTURA BRAZO-MÁSTIL
(MODELO 1)

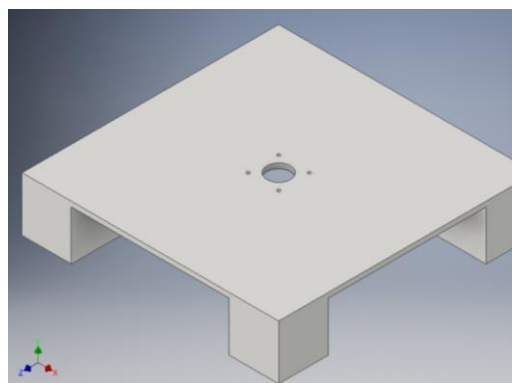


FIG. 4.3 BASE (MODELO 1)

El motor está anclado a la superficie inferior de la base mediante cuatro tornillos. El eje del motor sobresale hacia la parte superior a través un agujero realizado en la base.

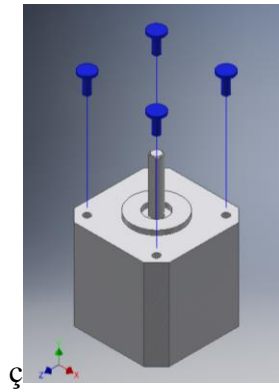


FIG. 4.4 MOTOR CON TORNILLOS
(MODELO 1)

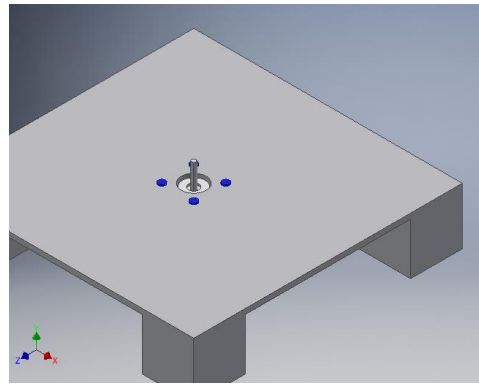


FIG. 4.5 MONTAJE DE MOTOR EN LA BASE
(MODELO 1)

La transmisión de movimiento desde el eje del motor a la estructura se realiza mediante un tornillo de apriete que ejerce presión en la parte plana del eje.

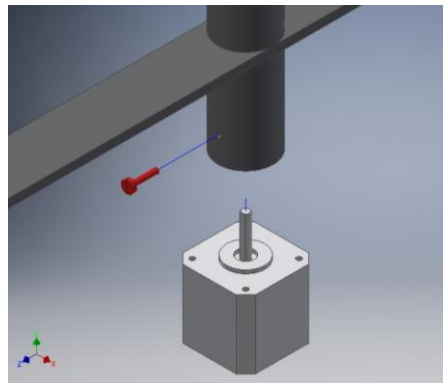


FIG. 4.6 MECANISMO DE TRANSMISIÓN (MODELO 1)

TABLA 4.2 LISTA DE COMPONENTES MODELO 1

N.º	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
1	Base	1	PVC
2	Estructura brazo-mástil	1	PVC
3	Motor NEMA23	1	Metálico
4	Tornillo eje	1	Metálico
5	Tornillo motor	4	Metálico

La tabla 4.2 muestra el listado de componentes del Modelo 1 y la representación del conjunto se muestra en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10. Es importante tener también en cuenta el montaje global, es decir, incluyendo los cables que unen las antenas al osciloscopio, ver figura 4.7. El Modelo 1 se ve afectado por ambos cables ya que se enrollarían

alrededor del soporte añadiendo un par contrario al movimiento que podría influir en la precisión del giro del motor.

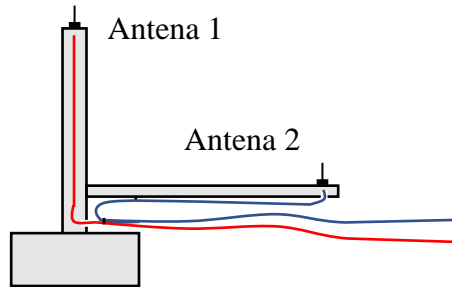


FIG. 4.7 MONTAJE DE CABLES EN MODELO 1

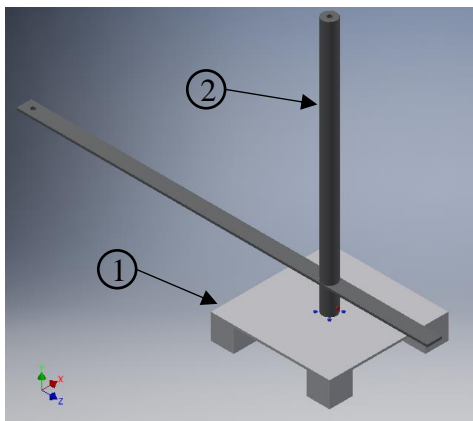


FIG. 4.8 CONJUNTO MODELO 1 (I)

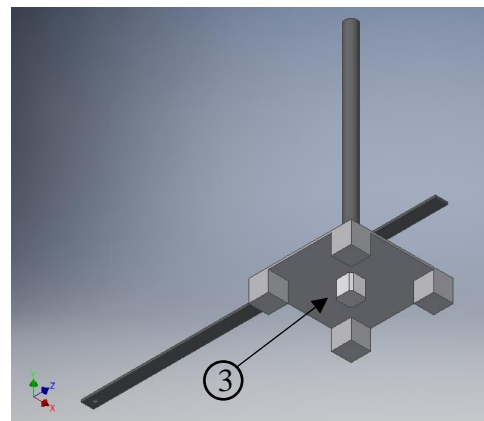


FIG. 4.9 CONJUNTO MODELO 1 (II)

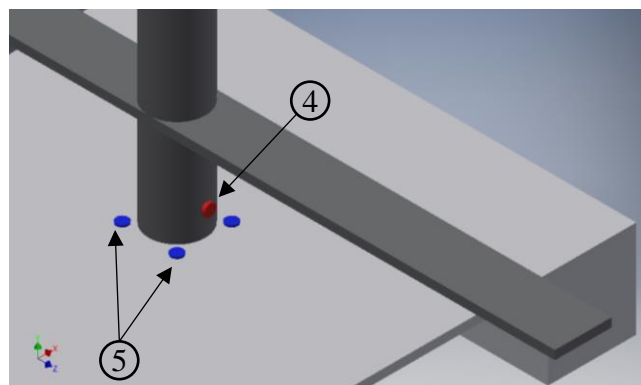


FIG. 4.10 CONJUNTO MODELO 1 (III)

4.2.2. MODELO 2

El principal objetivo de este modelo es hacer que al menos uno de los cables no se retuerza. Para ello, el brazo y el mástil forman dos piezas separadas que giran

relativamente una respecto a la otra. El mástil permanece fijo junto a la base, figura 4.11, siendo el brazo la única pieza móvil, figura 4.12. De esta manera el motor se sitúa en un lateral y actúa sobre el brazo desde esa posición, ver figura 4.13. Así, el mástil puede tener un agujero pasante en su interior para albergar el cable de la antena y permanecer inmóvil. Este planteamiento añade dos cuestiones a estudiar: cómo transmitir el movimiento del motor al brazo y cómo diseñar la interacción entre las partes móviles y fijas.

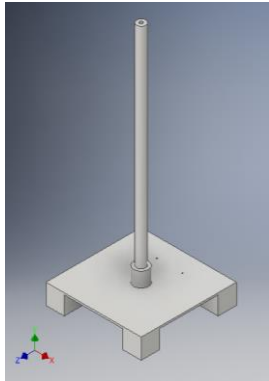


FIG. 4.11 ESTRUCTURA BASE-MÁSTIL
(MODELO 2)

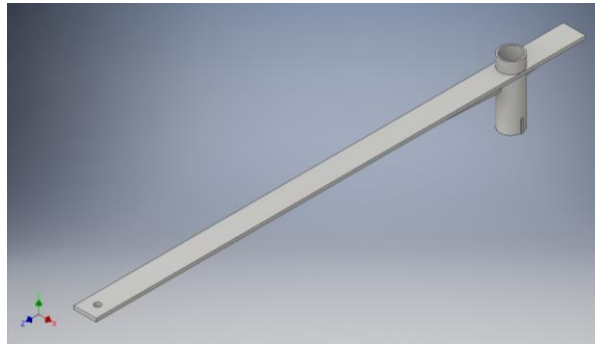


FIG. 4.12 BRAZO (MODELO 2)

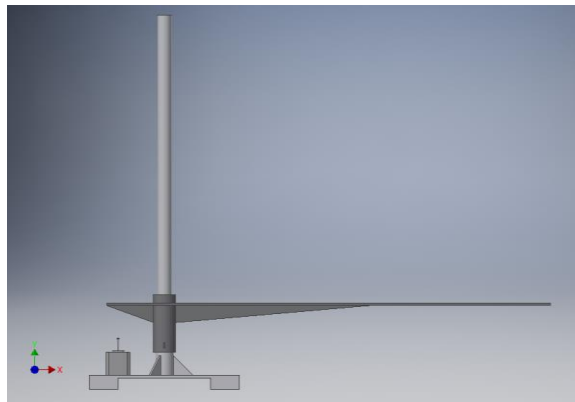


FIG. 4.13 MODELO 2

4.2.2.1. Transmisión de movimiento

La transmisión de movimiento del motor al brazo no puede ser directa desde una posición lateral, es necesario el uso de un mecanismo intermedio. Es de gran importancia la exactitud en la posición angular del brazo por lo que la transmisión de movimiento debe realizarse sin holguras. Los sistemas de transmisión propuestos son poleas dentadas con correa y engranajes. En ambos casos existe una relación de transmisión que puede ser beneficiosa. El motor utilizado en este proyecto es un motor paso a paso cuyo movimiento no es continuo, sino que en cada paso avanza unos grados determinados. Para modificar

el avance por paso puede usarse la relación de transmisión jugando con los diámetros de las ruedas. Esa relación también puede ayudar a reducir holguras ya que, si se plantea un sistema reductor, las holguras producidas en la rueda motriz son menores en la rueda conducida. Además, un sistema de transmisión reductor disminuye el par necesario para mover el brazo, lo que puede ser de gran interés debido a la longitud de la pieza a mover.

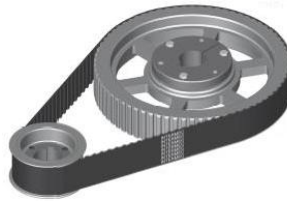


FIG. 4.14 POLEAS Y CORREA DENTADAS CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN $i \neq 1$ [24]

La primera opción propuesta son dos poleas dentadas con correa de distribución, ver figura 4.14. Este mecanismo consta de una polea motriz que mueve la rueda conducida gracias a la tensión de la correa. Las poleas son ruedas cilíndricas dentadas y engranadas con una cinta cerrada también dentada que recibe el nombre de correa. La relación de transmisión depende del tamaño de las ruedas pudiendo crear un sistema de reducción o de multiplicación de movimiento. Una de las ruedas iría insertada en el eje del motor y la otra abrazaría exteriormente la pieza móvil. Es importante ajustar la tensión de la cadena y para ello se puede usar una estructura como la de la figura 4.15 muy fácil de fabricar y a la que se ancla el motor mediante tornillos. Tiene forma de puente y dos ranuras alargadas que permiten el movimiento longitudinal del motor respecto a la base antes de anclarlo. El motor usado en este proyecto es muy común en el mercado de las impresoras 3D y, aprovechando este hecho, se podría adquirir fácilmente este mecanismo de transmisión. Por último, los materiales de este mecanismo también son favorecedores ya que la correa suele estar fabricada en caucho y aunque el material habitual de las ruedas sea acero o aluminio, también es posible encontrarlas en plástico.

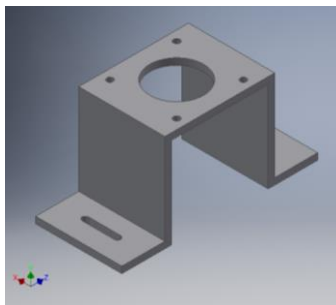


FIG. 4.15 PUENTE MOTOR (MODELO 2)

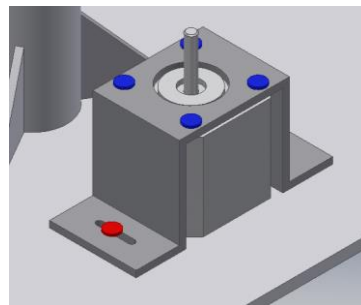


FIG. 4.16 MONTAJE DEL MOTOR SOBRE LA ESTRUCTURA DEL MÁSTIL (MODELO 2)

La propuesta alternativa es un engranaje. Este mecanismo se compone por al menos dos ruedas dentadas engranadas directamente, sin correa ni ningún otro elemento. La rueda motriz recibe el nombre de piñón y los dientes tienen una forma especial para evitar el roce entre ellos minimizando así el desgaste. Es un sistema de transmisión de movimiento muy preciso y robusto fabricado generalmente en acero.



FIG. 4.17 ENGRANAJE CON RELACIÓN DE TRANSMISIÓN $I \neq 1$ [25]

Ambas opciones son similares en precisión, por lo que cualquiera de las dos sería una buena solución. Debido a su accesibilidad en el mercado y al material, la opción más viable son las poleas con correa dentada.

4.2.2.2. Cojinetes

Los cojinetes son elementos mecánicos que favorecen el movimiento relativo entre dos superficies para reducir la fricción y minimizar el desgaste. Para esta cuestión se plantean dos posibilidades: casquillos de plástico o rodamientos.

El giro relativo de las dos piezas sería posible sólo con una holgura determinada entre los tubos del mástil y el brazo, ya que las características del material así lo permiten. Por ello, el objetivo de los casquillos de plástico es reducir la superficie de contacto para favorecer el giro y si además se emplea lubricante se reducen altamente la fricción y el desgaste. Los casquillos irían pegados al tubo del mástil, ver figura 4.18, y el brazo se apoyaría en un saliente del mástil. En la figura 4.19 se muestra el conjunto seccionado a la mitad. La holgura entre los casquillos y el brazo debe ser suficiente para permitir el giro libre pero tampoco excesiva para mantener la verticalidad de ambos tubos al girar. Estos elementos se adquieren de proveedor o también pueden ser fabricados fácilmente a partir de tubos con las medidas requeridas.

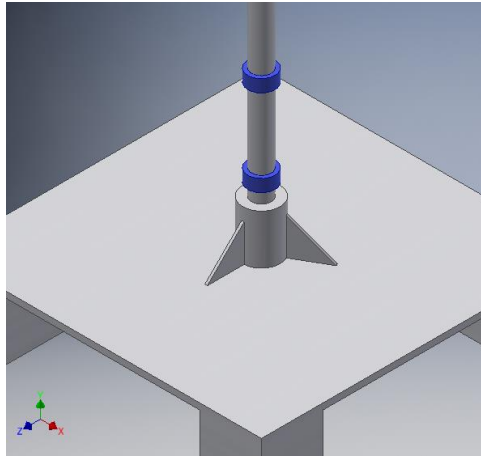


FIG. 4.18 MONTAJE DE CASQUILLOS SOBRE EL MÁSTIL (MODELO 2)

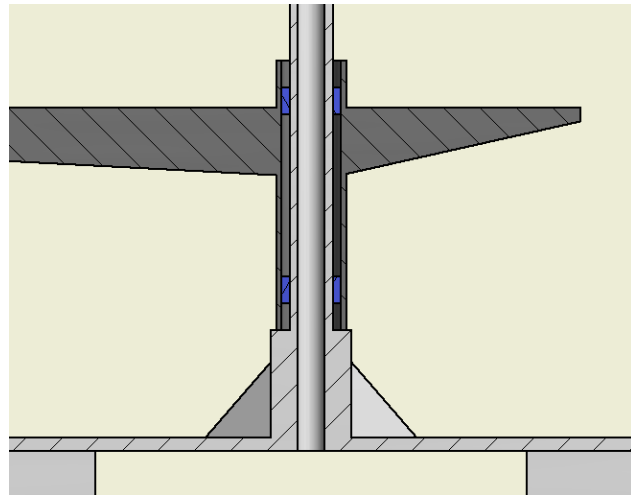


FIG. 4.19 SECCIÓN A LA MITAD DEL MODELO 2 CON CASQUILLOS

La segunda opción planteada son los rodamientos rígidos de bolas. Estos elementos se obtienen de proveedor y tienen cuatro partes principales: anillo exterior, anillo interior, elemento rodante y jaula. El anillo exterior giraría solidariamente con el brazo, así como el interior permanecería fijo con el mástil. Los elementos rodantes en este caso serían bolas cuya función es permitir el giro relativo entre ambos anillos. Por último, la jaula tiene la función de mantener fija la posición de las bolas. Además, la mayoría de los rodamientos llevan una tapa para conservar la calidad del giro, ya que podría acumularse suciedad en el interior (polvo, partículas, etc.).

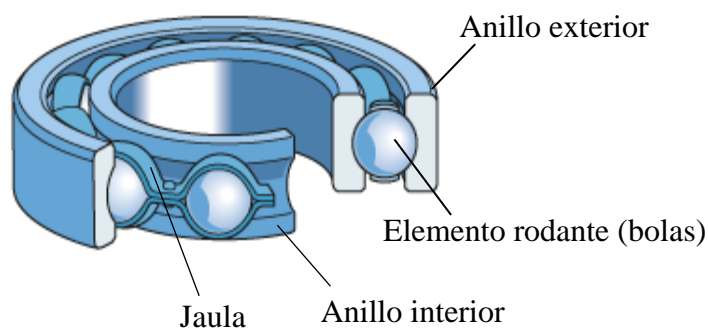


FIG. 4.20 COMPONENTES DE UN RODAMIENTO [26]

Para poder alojar los rodamientos en las posiciones requeridas hay que realizar cuencas en los tubos. Esto se traduce en cambios de diámetro tanto en el mástil como en el tubo del brazo. Los rodamientos quedarían apoyados en los salientes del mástil y el brazo estaría sujeto por el rodamiento superior mediante otro cambio de diámetro. Este montaje queda reflejado en la figura 4.21 donde también se aprecia que los rodamientos tienen distinto tamaño debido a los cambios de diámetro realizados.

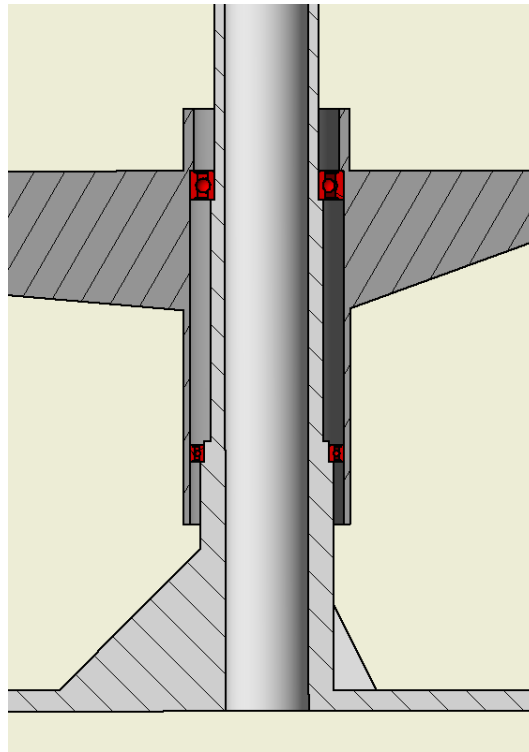


FIG. 4.21 SECCIÓN A LA MITAD DEL MODELO 2 CON RODAMIENTOS

En una comparación general de ambos elementos, los rodamientos serían una mejor opción si el mecanismo tuviera posibilidad de sufrir fatiga o tuviera que soportar grandes cargas, pero este no es el caso ya que la velocidad de giro será menor a 1 rpm y la estructura es ligera. Además, el montaje de los rodamientos aumenta la complejidad del diseño y suelen ser metálicos. A parte de querer evitar este tipo de material por las posibles interferencias en la recepción de la señal, la incompatibilidad entre el plástico y el metal acabaría generando holguras no asumibles en las cuencas de los rodamientos debido al desgaste del plástico. Por lo tanto, teniendo también en cuenta el factor económico, la mejor opción son los casquillos ya que aportan sencillez al diseño asegurando su funcionamiento.

4.2.2.3. Resolución final del MODELO 2

Tras haber elegido la transmisión de movimiento desde el motor al brazo y la interacción de este con el mástil, la lista de componentes del Modelo 2 queda representada en la tabla 4.3. Las imágenes del conjunto completo del modelo 2 se muestran en las figuras 4.22, 4.23 y 4.24. En la última figura se han omitido ciertos componentes para que otros quedaran visibles. El único elemento que no aparece en las imágenes es la correa de transmisión por su complejidad de diseño al ser un componente flexible

TABLA 4.3 LISTA DE COMPONENTES MODELO 2

N.º	NOMBRE	CANTIDAD	MATERIAL
1	Mástil	1	PVC
2	Brazo	1	PVC
3	Casquillo	2	PVC
4	Rueda dentada	2	Plástico
5	Correa de transmisión	1	Caucho
6	Puente motor	1	PVC
7	Motor	1	Metálico
8	Acople motor	1	Plástico
9	Tornillo	6	Metálico

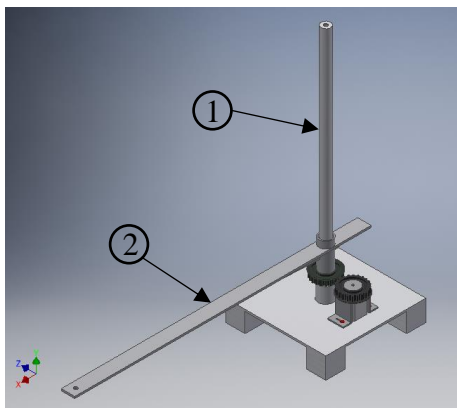


FIG. 4.22 CONJUNTO MODELO 2 (I)

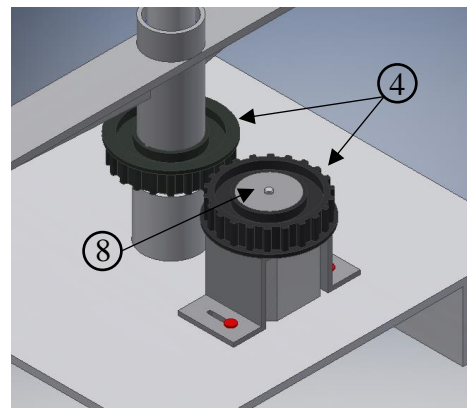


FIG. 4.23 CONJUNTO MODELO 2 (II)

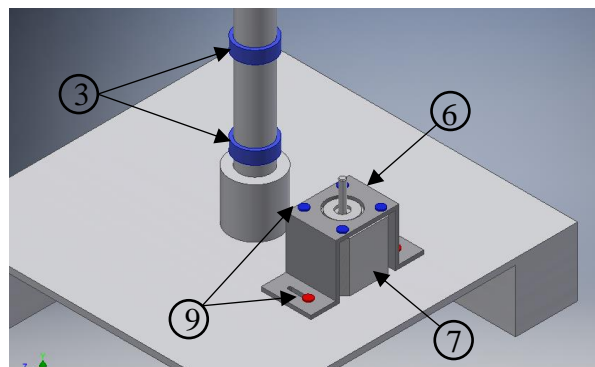


FIG. 4.24 CONJUNTO MODELO 2 (III)

Finalmente, con el diseño del Modelo 2 se ha conseguido dejar inmóvil el cable 1 aunque el cable 2 sigue enrollándose en la estructura. En la figura 4.25 se muestra un esquema del montaje de cables.

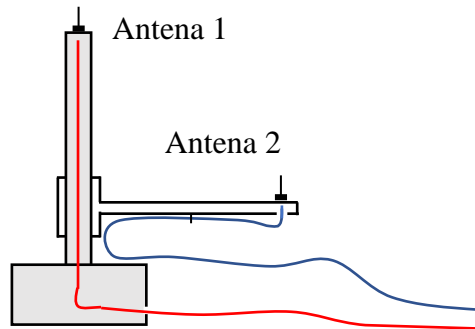


FIG. 4.25 MONTAJE DE CABLES EN MODELO 2

4.3. Comparación de modelos

La diferencia principal entre ambos modelos son las partes móviles y fijas. En el modelo 1 el mástil y el brazo forman una única estructura que gira respecto a la base, mientras que en el modelo 2 la única parte móvil es el brazo quedando fijos el mástil y la base. En la figura 4.26 se muestran ambos modelos marcando en azul las partes móviles de cada uno. Como consecuencia, otra diferencia importante es la transmisión de movimiento del motor a las partes móviles. En el modelo 1 el motor ataca directamente mientras que en el modelo 2 hay que usar poleas dentadas con correa como mecanismos de transmisión.

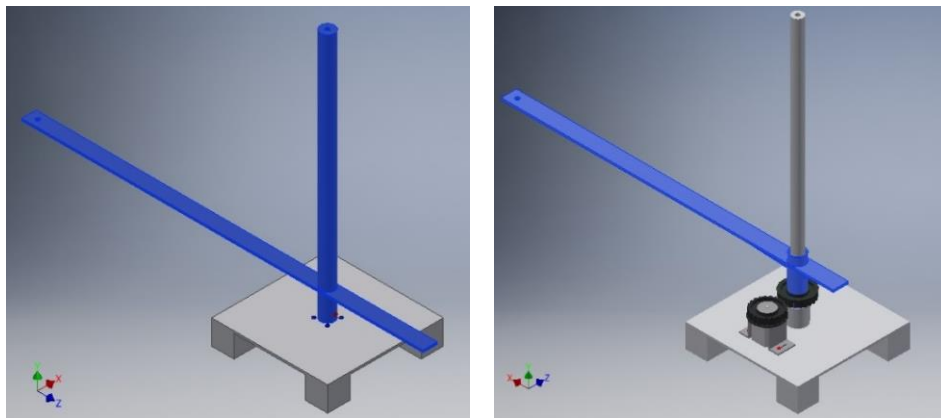


FIG. 4.26 PARTES MÓVILES DEL MODELO 1 (IZQ.) Y DEL MODELO 2 (DCHA.)

El modelo 1 destaca por su simplicidad de fabricación gracias a su reducido número de componentes. Esto hace que también sea el modelo más económico. Sin embargo, los cables del osciloscopio quedan sueltos y se enrollarían en la estructura al girar ejerciendo un par contrario al movimiento. Por otro lado, el modelo 2 consigue dejar inmóvil al menos uno de los cables y, gracias a la relación de transmisión, puede ajustarse el avance por paso. Con ello se reducen el par necesario para mover la máquina y las posibles

holguras de la transmisión. Como consecuencia, la complejidad del modelo 2 es elevada y con mayores costes.

Con este análisis, se concluye que el más viable es el modelo 1. Una solución al inconveniente de los cables es restringir el número de vueltas en la programación del microprocesador que controla el movimiento del motor. De este modo tenemos un modelo simple, económico y sin el problema de enrollamiento de cables.

4.4. Resolución final del soporte

La resolución final del soporte está basada en la idea del modelo 1, las barras vertical y horizontal girarán solidariamente respecto a la base siendo directa la transmisión de movimiento entre el motor y la estructura móvil. El material con el que se ha construido es PVC ya que cumple con las condiciones de diseño: no metálico, ligero y rígido. Como materiales de partida se han utilizado tuberías y otras piezas de fontanería.



FIG. 4.27 MODELO FINAL CON MONTAJE ELECTRÓNICO A LA DERECHA

Las barras horizontal y vertical son tubos de diámetro exterior de 32 y 25 mm con 2 mm de espesor. Los tubos tienen la longitud exacta para que entre las antenas haya una cota horizontal y vertical de 54 y 50 cm respectivamente, y están unidos por una pieza en

forma de T. En la figura 4.29 se muestra a la izquierda la instalación de la antena 1 sobre el tubo vertical mediante una tapa de plástico, mientras que a la derecha se ve la instalación de la antena 2 en el tubo horizontal para lo que se requiere un acople especial. En la tercera salida de la pieza T hay otro tubo de longitud inferior para unir la estructura móvil al motor. Este tubo es macizo y tiene un agujero vertical ciego en el que se encaja el eje del motor, de esta manera el eje soporta todo el peso de la estructura y la transmisión del giro queda asegurada gracias a la parte plana del eje. Por otro lado, la base es cilíndrica con un diámetro de 200 mm y 150 mm de altura, prácticamente maciza para añadir estabilidad al conjunto. En su interior alberga al motor dejando un pequeño conducto para los cables del mismo. Por último, los cables de las antenas irán por el interior de los tubos, ver figura 4.29, juntándose y saliendo en la pieza con forma de T por la parte contraria al tubo horizontal como se puede apreciar en la figura 4.28.



FIG. 4.28 PIEZA T CON SALIDA DE CABLES DE LAS ANTENAS

En un principio, la estructura estaba encajada en la base de tal manera que el motor no tenía suficiente par para iniciar el movimiento. Tras aumentar el juego entre las paredes de dichas piezas, el motor ya era capaz de mover la estructura, pero el arranque y avance de los pasos eran irregulares. Tras evaluar posibles causas, se llegó a la conclusión de que existía una pequeña holgura en la transmisión de movimiento, por lo que el motor ha pasado de estar simplemente introducido en el agujero del tubo a estar unido sólidamente a él. Gracias a esta modificación se consiguió un giro regular y preciso angularmente cumpliendo con el objetivo marcado.

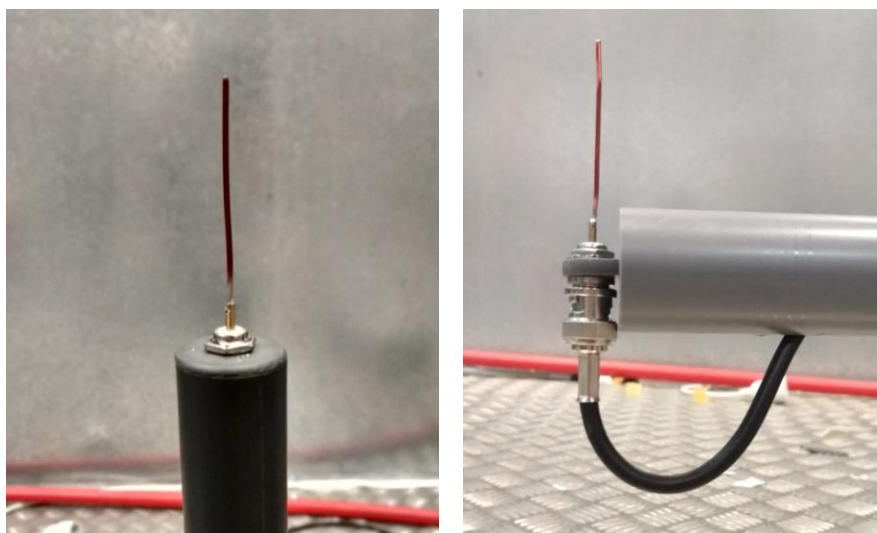


FIG. 4.29 INSTALACIÓN DE LA ANTENA 1 (IZQ.) Y ANTENA 2 (DCHA.) EN LA ESTRUCTURA

CAPÍTULO V: AUTOMATIZACIÓN DEL SOPORTE

El soporte se ha automatizado con el objetivo de realizar las medidas con una mayor seguridad y precisión. Este sistema de medida trabaja en entornos de alta tensión, por lo que moverlo manualmente supone un riesgo para el operario. También agiliza las medidas de prueba en el laboratorio, ya que antes se desconectaba la tensión cada vez que había que mover el brazo de la máquina. De esta manera, se conecta inicialmente la tensión y desde una posición segura, se controla el movimiento del soporte para realizar las medidas oportunas en distintas posiciones del brazo.

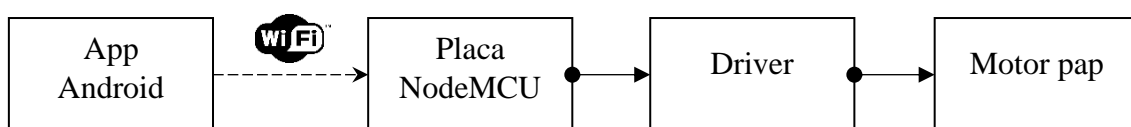


FIG. 5.1 ESQUEMA DE BLOQUES DE LA ELECTRÓNICA DE CONTROL

Para llevar a cabo esta automatización se ha escogido un motor paso a paso, que aporta la precisión angular necesaria en el giro. Además, estos motores necesitan un circuito de control externo, es decir, un driver. Para el control del motor se ha utilizado la placa de desarrollo NodeMCU y, por último, se ha diseñado una aplicación Android para el control remoto del movimiento mediante conexión WiFi.

5.1. Motor NEMA23

Para realizar las mediciones de las señales se necesita precisión y control en el ángulo de giro, por ello se ha utilizado un motor paso a paso. A diferencia de los motores DC que giran de forma continua cuando se les aplica una diferencia de tensión, los motores paso a paso giran de forma discreta (por pasos) [27]. Son motores más lentos pero puede controlarse con precisión su ángulo de giro.

Como todos los motores, los paso a paso están compuesto por un estator y un rotor. El estator lo forman bobinas enrolladas sobre unas placas dentadas metálicas. Las bobinas, cuando son alimentadas, generan un campo electromagnético convirtiendo las placas en electroimanes. Para alimentar las bobinas hay que aplicar una diferencia de tensión en sus extremos. Invertiendo esa conexión, conseguimos variar la polaridad del electroimán de la placa metálica. Por otro lado, el rotor es una rueda dentada con imanes de polaridad

permanente en cada uno de sus dientes, que se alinean con los dientes de las placas metálicas del estator sin llegar a estar en contacto. De esta manera los únicos apoyos del rotor son los rodamientos que permiten el giro relativo respecto al estator.

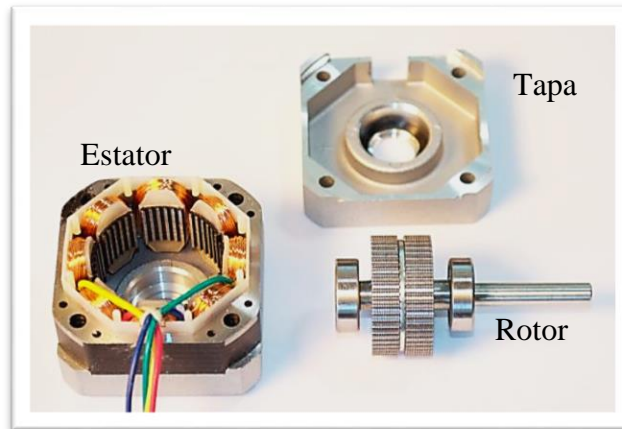


FIG. 5.2 DESPIECE MOTOR PASO A PASO

Cuando las bobinas se alimentan con una secuencia determinada de pulsos de avance [28], los campos electromagnéticos generados actúan sobre los imanes del rotor haciéndolo girar por el principio de atracción y repulsión de polos. Si esa secuencia de pulsos de avance se invierte, el motor gira en sentido contrario. Además, si la secuencia no es la correcta el motor no se moverá. La definición de esta secuencia dependerá de si el motor es unipolar o bipolar. El tipo del motor está definido por el número de bobinas que tiene.

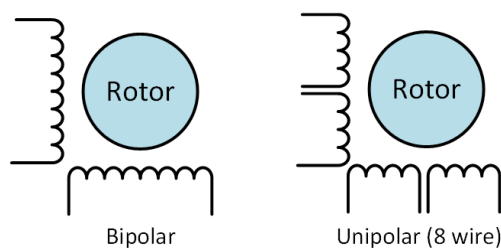


FIG. 5.3 TIPOS DE MOTOR PASO A PASO [28]

Las características principales de un motor paso a paso son los pasos por vuelta, la intensidad nominal, la tensión de alimentación, el par motor y la inercia. El número de pasos por vuelta de cada motor es el número de dientes que tiene la rueda central que hace mover el eje del motor. De esta manera el ángulo de giro no se mide en grados, se mide en pasos, aunque se puede obtener fácilmente la equivalencia entre ambas unidades. Por otro lado la intensidad nominal y la tensión de alimentación son determinantes para el

buen funcionamiento del motor ya que, si se superan los valores admitidos por las bobinas, estas podrían dañarse. Por último, el par define la capacidad de movimiento del motor. A medida que se aumenta la velocidad de giro, el par motor disminuye. Como el soporte diseñado tendrá una muy baja velocidad (menos de 1 rpm), el motor estará siempre trabajando con el máximo par. En la figura 5.4 se muestra la curva del par motor frente a la velocidad de giro.

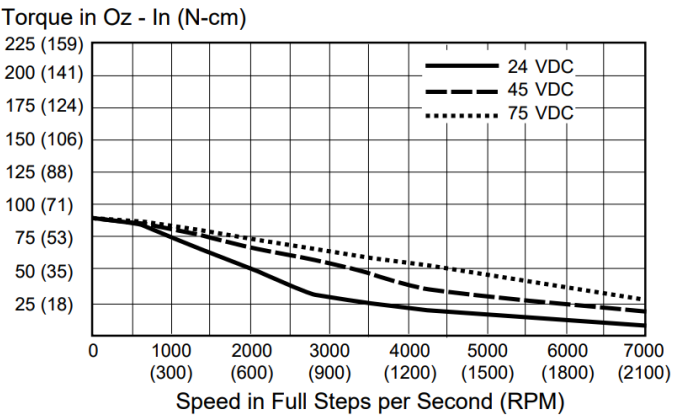
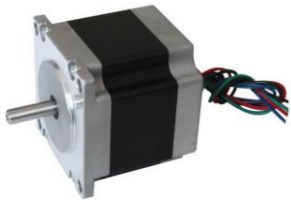


FIG. 5.4 CURVA DEL PAR MOTOR DE RETENCIÓN (NEMA23) [29]

El motor elegido en un principio fue NEMA17, donde NEMA son las iniciales de *National Electrical Manufacturers Association* [30]. Esta es la asociación de fabricantes de componentes eléctricos más grande de Estados Unidos. El número 17 hace referencia al tamaño de la cara frontal del motor (1.7x1.7 pulgadas). Tras el montaje del equipo completo, el motor no tenía par suficiente para mover el mecanismo. Por ello el motor usado finalmente es el **NEMA23**, de mayor tamaño (2.3x2.3 pulgadas) y con mejores características. Es un motor bipolar de cuatro hilos y se usa comúnmente en la fabricación de impresoras 3D. En la tabla 4 se muestran las características principales.

TABLA 5.1 CARACTERÍSTICAS NEMA23

Pasos por vuelta	200 (1.8º/paso)	
Intensidad por fase	2.8 A	
Tensión de alimentación	8.2 – 45 V	
Par motor	1.26 N·m	
Inercia del rotor	280 g·cm³	
Masa	0.68 kg	

5.2. Driver DRV8825

En este proyecto, el driver es un controlador intermedio que convierte las órdenes lógicas de la placa en las tensiones e intensidades que se necesitan para manejar el motor [31]. Estos controladores manejan la alimentación de las bobinas proporcionando la secuencia de pulsos adecuada para mover el motor y regulando la intensidad que circula por el mismo para no dañar la electrónica del circuito ni las bobinas del motor.

El control de la alimentación del motor se consigue mediante puentes-H. Este es un circuito electrónico comúnmente usado para hacer que un motor gire en ambos sentidos. En este caso el puente-H lo que modifica es la polaridad de las bobinas al invertir la conexión de los extremos de las mismas (uno a masa y el otro a +V y viceversa) y está construido a partir de transistores MOSFET. El motor NEMA23 es bipolar, tiene dos bobinas, y por ello el driver elegido necesita dos puentes-H. En el Anexo A está adjunto el circuito interno del driver DRV8825 donde se puede observar la conexión entre los puentes-H y las bobinas del motor.

Además de controlar el movimiento, el driver regula la intensidad que circula por las bobinas del motor. Esta regulación es necesaria ya que, para obtener una respuesta rápida y generar un buen par, se aplican voltajes más altos de lo que las bobinas podrían soportar prolongados en el tiempo. La fuerza del campo magnético generado por las bobinas es proporcional a la intensidad que circula por ellas [32]. Pero la intensidad en las bobinas actúa con cierta inercia, es decir, tardan un tiempo en alcanzar la intensidad definida por el voltaje aplicado y cuando ese voltaje es desconectado, la bobina tiende a mantener la intensidad. El tiempo que tarda en alcanzar la intensidad deseada se llama régimen transitorio. En la figura 5.5 se muestra la respuesta de una bobina cuando se le aplica tensión. Esto demuestra por qué si se suministra la tensión nominal que soportan las bobinas, el motor no tendría una respuesta inmediata, incluso podría no alcanzar el suficiente par para moverse. Entonces se aplican voltajes más altos regulando la intensidad de tal manera que no dañe de forma irreparable la bobina. El driver mide la corriente que circula por las bobinas y corta automáticamente cuando el valor de la intensidad alcanza un cierto límite [31]. Además, el driver dispone de un potenciómetro para ajustar la corriente límite adecuada para el motor.

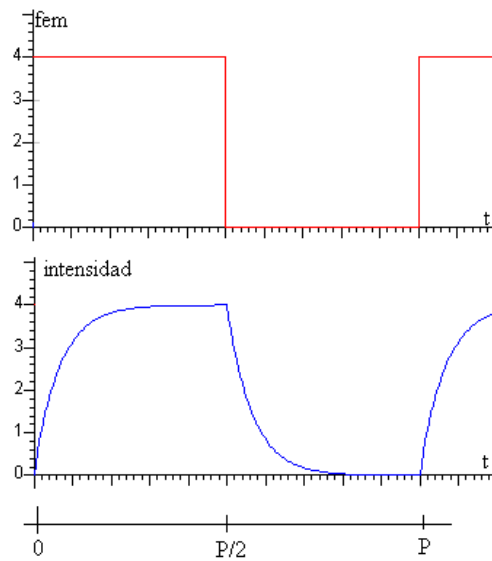


FIG. 5.5 RESPUESTA DE UNA BOBINA BAJO VOLTAJE [32]

Por otro lado, la mayoría de drivers para motores paso a paso tienen la opción de modificar el avance por paso. El microstepping es la técnica por la cual se obtienen pasos inferiores al nominal [33]. Esto se consigue variando el porcentaje de corriente aplicada a cada bobina. Si para realizar un paso completo las señales de intensidad son cuadradas, para el microstepping se aplican señales escalonadas. La figura 5.6 es un ejemplo comparativo de las señales de intensidad del driver A4988 para avanzar un paso completo o sólo la mitad.

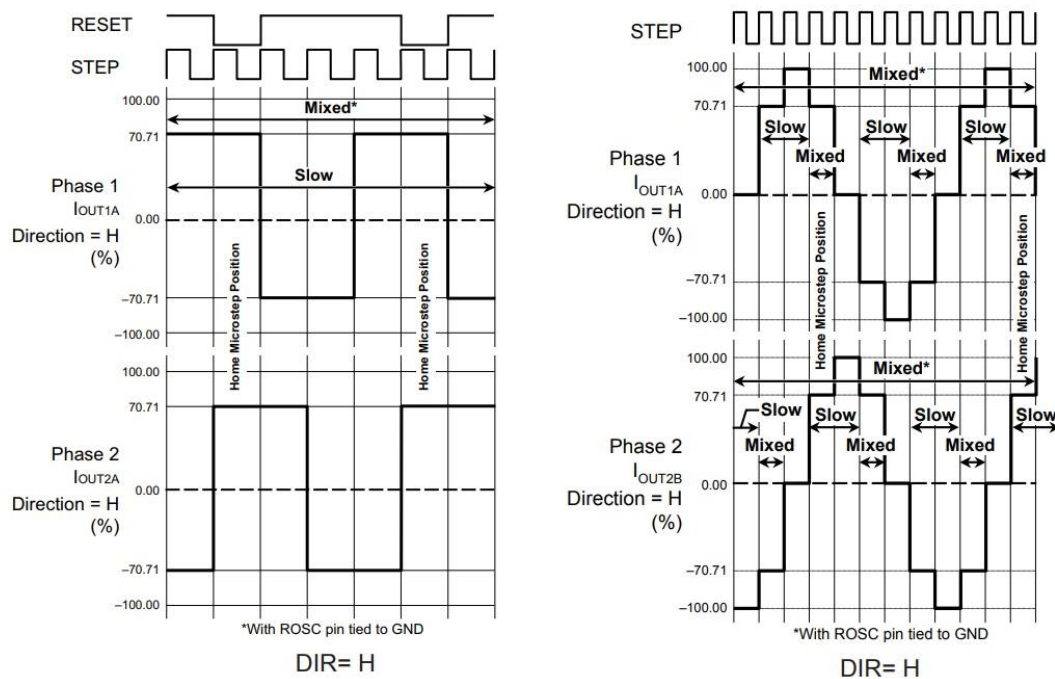



FIG. 5.6 INTENSIDAD EN FULL-STEP (IZQ.) Y HALF-STEP (DCHA.) DEL A4899 [34]

La elección del driver viene definida por la intensidad del motor. En un principio se utilizó el driver A4988 apropiado para el motor NEMA17, pero debido al cambio de motor por el NEMA23 que es más potente, el driver utilizado es el **DRV8825** con una intensidad mayor que el anterior. Este driver tiene un manejo simple ya que sólo necesita dos entradas digitales para definir el funcionamiento del motor: señal de pasos y señal de dirección. Incluye seis posibilidades distintas de microstepping lo que aumenta la versatilidad del motor. Además, tiene protecciones contra sobreintensidad, cortocircuito, sobretensión y sobretensión [33]. En la tabla 5.2 se muestran las características destacadas del driver.

TABLA 5.2 CARACTERÍSTICAS DRIVER DRV8825

Intensidad máxima	± 2.5 A	
Tensión de alimentación	8.2 - 45 V	
Microstepping	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	

Uno de los inconvenientes de los drivers es el calentamiento que sufre el chip durante su funcionamiento [33]. En el DRV8825 en concreto, este hecho se ve agravado cuando funciona con intensidades superiores a 1.5 A. Por ello, es casi obligatorio usar un disipador de calor o incluso un sistema de ventilación forzada. Es importante tener una buena refrigeración ya que cada vez que se alcanza la temperatura crítica, el driver deja de funcionar cortando la alimentación del motor.

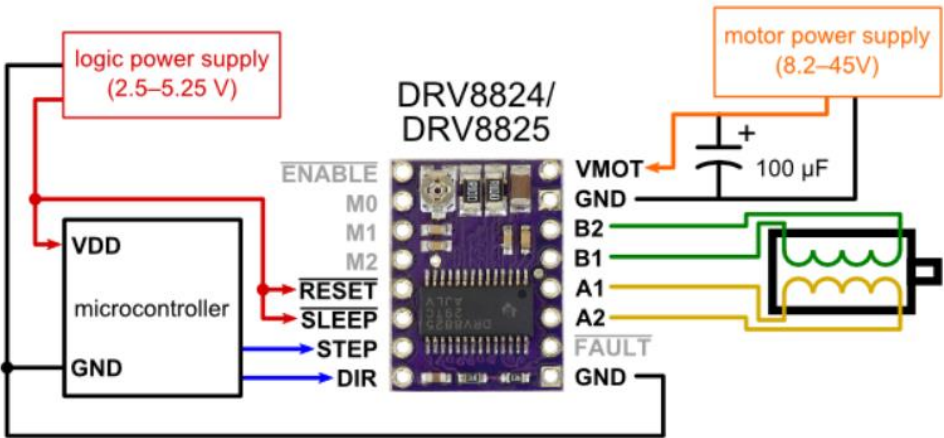


FIG. 5.7 ESQUEMA DE CONECTIVIDAD DRIVER DRV8825 [35]

La figura 5.7 muestra el pinedo del driver DRV8825 [35]. Tiene dos entradas digitales principales: *STEP* y *DIR*. El pin *STEP* recibe la señal pulsada que define el movimiento

del motor cuyo número de pulsos equivale al número de pasos de avance y el pin *DIR* define la dirección de giro: *HIGH*, sentido de las agujas del reloj, o *LOW*, sentido contrario. Los pines de entrada *M0*, *M1* y *M2* configuran el tipo de microstepping según la tabla 5.3. Con los pines \overline{RESET} , \overline{SLEEP} y \overline{ENABLE} se configuran los distintos estados lógicos del driver. El primero resetea el chip, el segundo activa el estado de mínimo consumo y el último habilita el funcionamiento. Por otro lado, los pines *A1*, *A2*, *B1* y *B2* son de salida y se conectan a las bobinas del motor para controlar su alimentación y movimiento. Otro pin de salida es \overline{FAULT} , que cambia de estado cuando una de las protecciones se activa indicando así el fallo del funcionamiento. Por último, los pines de alimentación son tres, V_{MOT} y dos *GND*, a través de los cuales se alimenta el driver y el motor. El pin V_{MOT} puede tomar valores entre 8.2 y 45 V.

TABLA 5.3 CONFIGURACIONES DE MICROSTEPPING [33]

	M0	M1	M2
<i>Full step</i>	Low	Low	Low
<i>1/2 step</i>	High	Low	Low
<i>1/4 step</i>	Low	High	Low
<i>1/8 step</i>	High	High	Low
<i>1/16 step</i>	Low	Low	High
<i>1/32 step</i>	High	Low	High
<i>1/32 step</i>	Low	High	High
<i>1/32 step</i>	High	High	High

5.3. Placa de desarrollo NodeMCU

El NodeMCU es una placa de desarrollo basada en el chip ESP8266, cuyos hardware y software son totalmente abiertos y pueden encontrarse en GitHub [36]. El lenguaje de programación inicial de la placa fue LUA, aunque más adelante se hizo posible la programación en lenguaje C con el IDE de Arduino [37], entorno en el que se ha desarrollado este proyecto. La principal característica de esta placa es el módulo WiFi que contiene. Este módulo abre un amplio abanico de posibilidades en el IoT (Internet of Things o Internet de las Cosas), término que describe sistemas inalámbricos que conectan

dispositivos y aparatos de la vida cotidiana [38]. En este proyecto, la placa estará programada para controlar el giro del motor paso a paso según las órdenes que reciba desde un dispositivo conectado por WiFi.

Es importante remarcar la diferencia entre placa de desarrollo y microcontrolador. La placa NodeMCU no es un microcontrolador, sino que lo contiene, y su función principal es facilitar la programación de dicho componente [39]. Un microcontrolador o MCU (del inglés Microcontroller Unit) es un circuito integrado programable que ejecuta las órdenes cargadas en su memoria. A continuación se detallan los distintos niveles que aparecen en la figura 5.8.

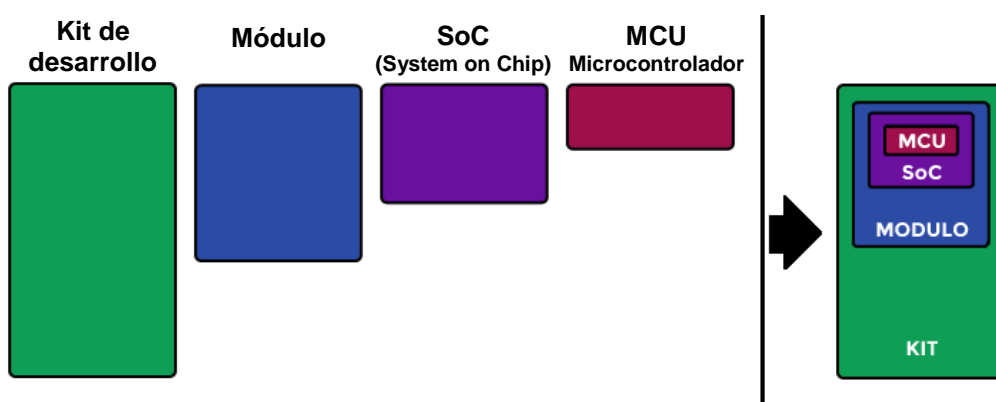


FIG. 5.8 BLOQUES PLACA DE DESARROLLO

El microcontrolador está integrado en el chip ESP8266EX [40], el cual contiene en su interior todo lo necesario para funcionar de forma autónoma como si fuera un ordenador. El MCU integrado en dicho chip es el Tensilica L 106 de 32 bit, lo que es una muy buena propiedad ya que otros chips similares contienen microcontroladores de 8 bit. Además, trabaja a una velocidad de 80 MHz alcanzando valores máximos de 160 MHz. En la figura 5.9 se puede observar que, a pesar de su importancia, el microcontrolador sólo representa una pequeña parte del chip, marcado en rojo en la imagen. Por otro lado, el ESP8266 tiene una memoria RAM de aproximadamente 50 kB disponibles para el uso. Sin embargo, no contiene memoria ROM que permita almacenar los programas, por lo que necesitará una memoria externa. Respecto a los pines de entrada y salida, tiene 17 pines GPIO (General Purpose Input/Output). Este tipo de pines son digitales y pueden configurarse como entrada o salida según se necesite. Tiene también una entrada analógica con un transformador ADC (Analog-to-digital Converter) con 10-bit de precisión y 4 salidas PWM (Pulse-width Modulation). Por último, el chip ESP8266EX contiene un módulo WiFi gracias al cual se realizarán las conexiones entre los distintos dispositivos

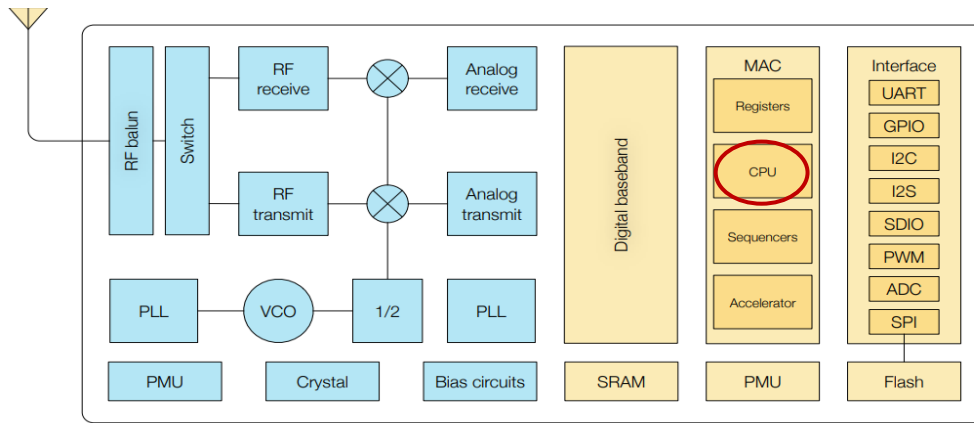


FIG. 5.9 DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONALES ESP8266 [40]

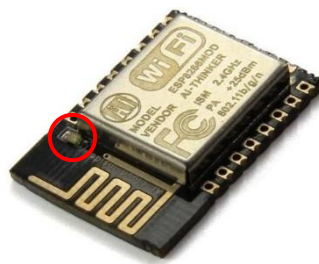


FIG. 5.10 MÓDULO ESP-12E

El chip ESP8266EX está integrado en el módulo ESP-12E, el cual incorpora una antena y una memoria flash de 4 MB de capacidad. Esta última es usada para almacenar los programas cargados en la placa ya que el chip ESP8266 carece de memoria ROM. Además, el módulo facilita el acceso a los pines del chip conectándolos internamente a los del módulo ESP-12E. Hay que tener siempre en cuenta que el módulo puede ser alimentado únicamente por 3.3V. La figura 5.10 es una imagen del módulo ESP-12E. La memoria flash y el chip ESP8266 están alojados en el interior de la tapa metálica, y la antena es la pista dorada impresa en el circuito. Además, dispone de un led marcado en rojo en la imagen accesible a través de uno de sus pines.

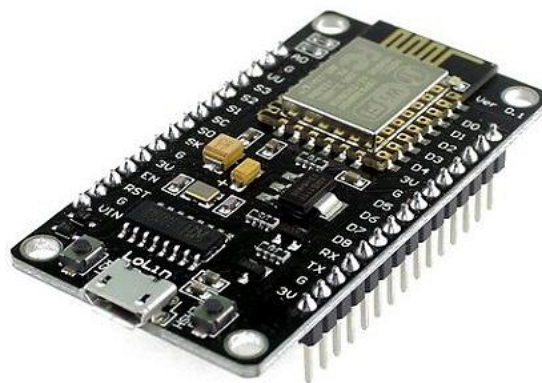


FIG. 5.11 PLACA NODEMCU

La placa de desarrollo es el nivel superior que engloba el resto de bloques. A parte del módulo ESP-12E, la placa tiene instalados un puerto USB, un limitador de tensión y dos pulsadores. El puerto tiene un conversor Serie-USB para poder alimentar la placa fácilmente con un cable desde el ordenador y/o comunicarse con él. Por otro lado, el limitador ajusta la tensión que llega al módulo porque la placa puede ser alimentada con 3.3 o 5 V. De esta manera la tensión del módulo es siempre 3.3 V sea cual sea la alimentación de la placa. Con respecto a los dos pulsadores, la figura 5.12 muestra su posición. El botón Reset reinicia el funcionamiento de la placa ejecutando desde cero el programa ya que está conectado al pin Reset del chip. Por otro lado, el botón Flash está conectado al pin D3 y nos permite activar el estado de carga de programa. Todos los microcontroladores tienen dos estados de funcionamiento, el estado de ejecución en el que el programa se desarrolla con normalidad, y el estado de carga en el que se transfiere el programa del ordenador a la placa. No obstante, con el IDE de Arduino ya no es necesaria la activación del estado de carga manualmente, sino que se acciona automáticamente al pulsar el botón ‘subir programa’ en el compilador. Por último, la figura 5.12 también muestra la posición del led. Este está conectado internamente al pin de la placa D4 lo que facilita su accesibilidad. Es importante saber que el led tiene la polaridad invertida, es decir, se encenderá cuando el estado del pin sea *LOW* y se apagará cuando el estado sea *HIGH*. Además, este led tiene una doble función, indica cuándo se está subiendo un nuevo programa parpadeando rápidamente mientras dura la transmisión.

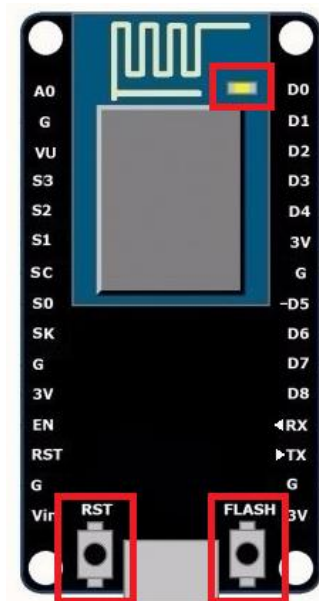


FIG. 5.12 LED Y PULSADORES DEL NODEMCU

5.3.1. Pineado de la placa

Los pines de la placa están conectados internamente con los pines del módulo que, a su vez, están conectados con los del chip y el microcontrolador. A través de los pines de la placa se puede acceder a todos los bloques de la misma. En la figura 5.13 se muestra un esquema general del pineado.

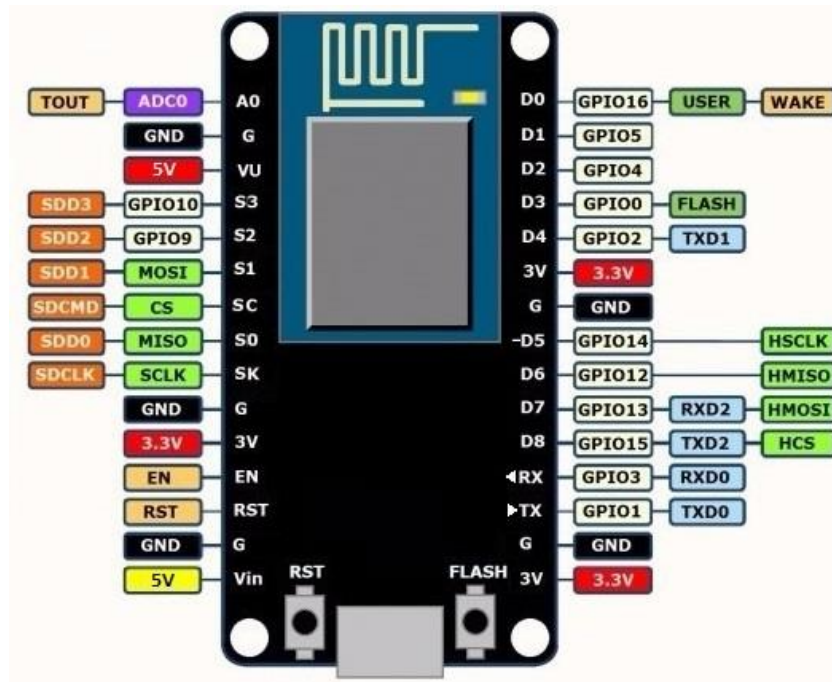


FIG. 5.13 PINEADO DE LA PLACA NODEMCU

Los pines digitales de la placa pueden configurarse como entradas o salidas y tienen dos designaciones distintas, según los pines del chip o según los pines de la placa [37]. Por ejemplo, el pin denominado en la placa como *D2* corresponde al pin *GPIO4* en la nomenclatura del ESP8266. El entorno IDE Arduino permite la programación con ambas designaciones por lo que los dos códigos que se muestran en la figura 5.14 son equivalentes. No obstante, de los diecisiete pines digitales que tiene el chip ESP8266, sólo trece son accesibles desde la placa. Nueve de ellos son denominados desde *D0* a *D8* como se puede apreciar en la figura 5.13. Los pines denominados *RX* y *TX*, conectados respectivamente a *GPIO3* y *GPIO1*, pueden usarse para la transmisión de programas con el ordenador mediante un puerto serie. Esto no es muy habitual porque la placa ya dispone de su propio puerto. Los últimos dos pines digitales son *S2* y *S3*, conectados a *GPIO9* y *GPIO10*, que pueden usarse como pines de comunicación SPI (del inglés *Serial Peripheral Interface*).

```
//Acceso a los pines con la nomenclatura de NodeMCU
pinMode(D2, OUTPUT);
digitalWrite(D2, HIGH);

//Acceso a los pines con la nomenclatura de ESP8266
pinMode(4, OUTPUT);
digitalWrite(4, HIGH);
```

FIG. 5.14 COMPARACIÓN DE NOMENCLATURA DE LOS PINES DIGITALES DE LA PLACA

Por otro lado, los pines *S1*, *SC*, *S0* y *SK* son pines de conexión SPI que sirven de comunicación síncrona con periféricos, es decir, sensores o actuadores que se quieran controlar desde la placa. Uno de los pines proporciona una señal reloj, *SK*, con el que se sincroniza la comunicación. Los pines *S1* y *S0*, así como los pines digitales *S2* y *S3*, son entradas y salidas disponibles para esta comunicación SPI. Por último, el pin *chip select* *SC* permite seleccionar uno de los chips conectados.

Los pines *EN* y *RST* cumplen su función común. El primero habilita o deshabilita el funcionamiento del circuito mientras que el segundo reinicia el programa y está conectado al pulsador *RST*.

Además, la placa NodeMCU dispone de un pin analógico de entrada que recibe el nombre de *A0*. Esta entrada tiene un conversor ADC de 10-bit y un rango de entrada de 0 a 1V que gracias a un divisor de tensión se extiende de 0 a 3.3V.

Por último, la NodeMCU contiene tres pines de alimentación de 3.3V y dos de 5V, cada uno con su respectivo pin de masa, *GND*. Además, la placa también puede ser alimentada con 5V mediante el puerto serie. Si se alimenta el NodeMCU con 5V, la electrónica de la placa recibe 3.3V gracias al regulador de tensión y los pines de 5V funcionan correctamente. En caso de que se alimente con 3.3V, entonces la electrónica de la placa funciona correctamente pero los pines de 5V ya no suministran dicho voltaje.

5.3.2. Programación de la placa NodeMCU

El objetivo del programa es controlar el giro del motor que mueve el soporte completo. Para definir el giro son necesarios tres parámetros: la velocidad, el número de pasos y el sentido de giro. Estos datos serán introducidos por parte del usuario para cada movimiento

del motor. El programa se compone de tres bloques o funciones: *setup()*, *loop()* y *handleSpin()*. Las dos primeras son las funciones comunes en un programa de este tipo, la primera sólo se ejecuta al inicio del programa y la segunda se ejecuta en bucle hasta que se desconecte la alimentación de la placa o se reinicie su funcionamiento. La función *handleSpin()* genera la señal gestionando la información necesaria para producir el giro del motor.

La comunicación entre el usuario y la placa se realiza mediante conexión WiFi, creando un punto de acceso propio y un servidor web [41]. Para ello se necesitan dos librerías: *ESP8266WiFi.h* [42] que incluye los métodos necesarios para facilitar la conexión del chip ESP8266 a una red WiFi, y *ESP8266WebServer.h* [43] para facilitar la creación del servidor y el manejo de las solicitudes HTTP. Estas librerías se incluyen al inicio del programa donde también se define el puerto de comunicación del servidor. Se ha elegido el puerto por defecto de HTTP, 80, por lo que no es necesario especificarlo posteriormente en la URL [44].

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>

ESP8266WebServer server(80);
```

La configuración del servidor se recoge en la función *setup()*. Primero se define la velocidad del puerto serie a través del cual se podrá depurar el programa. A continuación, se crea el punto de acceso WiFi [45] definiendo las credenciales para conectarse a la red creada (identificación ssid y contraseña). También se han incluido comunicaciones serie para comprobar por el monitor que el punto de acceso se ha creado correctamente. La dirección IP asignada al dispositivo por defecto al crear un punto de acceso es 192.168.4.1 [45], por lo que no es necesario usar ninguna función que consulte dicha dirección. Tener una dirección de IP fija facilita el desarrollo y diseño de la aplicación *Motor Spin Controller*, ver apartado 5.4. A continuación se muestran las líneas de código donde se crea el punto de acceso.

```
Serial.begin(115200);
WiFi.softAP(ssid, password);

while (WiFi.softAP(ssid, password) == false){
    delay(500);
    Serial.print("\nCreating Access Point...");
}
```



```
Serial.print("\n\nAccess Point CREATED");  
Serial.print("\n\nssid: NodeMCU_ESP8266");  
Serial.print("\n\npassword: Nema23/*");
```

El siguiente paso es concretar las líneas de código que deben ejecutarse cuando el servidor recibe una determinada solicitud. Esto se lleva a cabo con el método *server.on()*, donde en un primer parámetro se especifica la dirección que cuelga del root (/) y en el segundo se incluye el código a ejecutar. En este caso se llama a la función *handleSpin()*, aunque el código se podría haber desarrollado directamente en el segundo parámetro de *server.on()*. Para finalizar la configuración, se inicia el servidor con el método *server.begin()* [46]. A continuación se muestra la configuración del servidor.

```
server.on("/spin", handleSpin);  
server.begin();
```

Por último, se introduce el método *server.handleClient()* en la función *loop()* para gestionar y llevar a cabo las peticiones HTTP que recibe el servidor.

```
void loop() {  
    server.handleClient();  
}
```

La función *handleSpin()* recoge las líneas de código que el servidor debe ejecutar cuando recibe la petición <http://192.168.4.1/spin>. Además, esta petición debe incluir los tres parámetros necesarios para definir el giro del motor: velocidad, numero de pasos y sentido de giro. Para ello se usan parámetros de consulta [47], que se envían al servidor en una cadena de caracteres junto con la ruta URL y separada de esta por un signo de interrogación (?). Un parámetro es definido por su nombre y su valor asociados con el símbolo igual (=), y si se necesita incluir más parámetros se separan por el símbolo ampersand (&). A continuación, se muestra un ejemplo de URL válido para el programa en cuestión.

<http://192.168.4.1/spin?dir=HIGH&steps=25&speed=100>

En la URL anterior se introducen tres parámetros distintos numerados desde 0 a 2. El parámetro 0 se llama 'dir' con valor 'HIGH', el parámetro 1 se llama 'step' con valor '25', y el parámetro 2 se llama 'speed' con valor '50'. Por lo tanto, la función *handleSpin()* interpreta los parámetros introducidos por el usuario para definir las propiedades del giro y envía una respuesta a través del servidor. En el inicio de la función

se obtienen los valores de los parámetros [47]. Cabe destacar que, aunque haya parámetros con valor numérico, el método utilizado siempre devuelve cadenas de caracteres. Para interpretar y usar correctamente los valores obtenidos, hay que transformar los números en variables de tipo entero. En el extracto de código siguiente se muestra cómo obtiene los valores de los parámetros velocidad y número de pasos y cómo los convierte en variables de tipo *int*. En el caso de la dirección de giro analiza si el parámetro tiene valor ‘HIGH’ para seleccionar una dirección y si no, seleccionar la dirección de giro contraria. Además, con las variables *nant* y *n* se lleva la cuenta del número de pasos girado y así poder controlar el número de vueltas.

```
datoSteps = server.arg(1);
steps = datoSteps.toInt();

datoSpeed = server.arg(2);
Speed = datoSpeed.toInt();
stepDelay = Speed/2;

nant = n;

if(server.arg(0)=="HIGH"){
    digitalWrite(dirPin, HIGH);
    n=n+steps;
}else{
    digitalWrite(dirPin, LOW);
    n=n-steps;
}
```

Con todos los parámetros del giro interpretados, se crea la señal cuadrada de pasos utilizando un bucle. Cada repetición del bucle genera un paso, por lo que debe tener tantas repeticiones como pasos haya solicitado el usuario avanzar, ver figura 5.15. Para crear un paso, hay que generar un periodo completo de una señal cuadrada, por lo que se pone en alto el pin de pasos durante la mitad del período y se pone a nivel bajo durante la otra mitad. El período de un pulso equivale a la velocidad de giro, por lo tanto, el ancho de pulso será la mitad de ese valor. Las unidades de la velocidad de giro son milisegundos por paso (ms/paso).

```
for (int x = 0; x < steps ; x++) {
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delay(stepDelay);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delay(stepDelay);
}
```

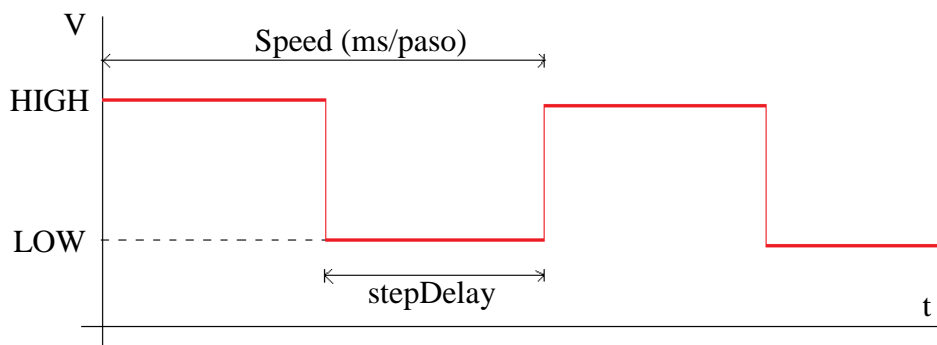


FIG. 5.15 SEÑAL DE AVANCE

Una vez terminado el bucle, el motor habrá realizado el giro completo y, para avisar al usuario de este hecho, se envía una respuesta a través del servidor [41]. Para ello hay que especificar tres argumentos. El primero de ellos indica el tipo de respuesta que en este caso se usa el código 200 correspondiente a la respuesta ‘OK’ [48]. El segundo argumento indica el tipo del contenido y en este caso es un texto plano ‘text/plain’ [49]. El último argumento contiene la respuesta en la cadena de caracteres ‘message’.

```
message = "El motor ha girado " + datoSteps + " pasos.";
server.send(200, "text/plain", message);
```

Por último, en el capítulo 4 se comenta que el enrollamiento de los cables coaxiales alrededor del mecanismo podría suponer un problema. Para evitar esto se ha añadido una modificación de mejora en el programa original que limita el número de vueltas de giro. Añadiendo una variable contador y una instrucción condicional se ha limitado el número de pasos de -200 a 200, lo que supone una vuelta en cada sentido de giro. Cuando se reciben los datos de giro por parte del usuario, el programa calcula los pasos acumulados. Si la dirección de giro es ‘HIGH’ suma los pasos solicitados y si es la dirección contraria los resta. Seguidamente, comprueba si el número de pasos acumulados está comprendido en el rango admisible. De ser así, ejecuta el bucle de la señal y envía un mensaje diciendo que el motor ha girado tantos pasos. En caso contrario, el programa calcula los pasos restantes para llegar al límite y envía un mensaje diciendo que no se ha podido realizar el giro ya que solo quedan tantos pasos disponibles en esa dirección.

En resumen, el programa permite la interacción entre el usuario y la placa a través de un servidor por conexión WiFi. Con los tres parámetros aportados por el usuario es capaz de mover el motor teniendo en cuenta la limitación en el número de vueltas por el

enrollamiento de los cables y devuelve una respuesta al usuario en función de si es posible realizar el giro o no. El código completo se puede encontrar en el Anexo B.

5.4. Aplicación *Motor Spin Controller*

La aplicación para Android tiene como objetivo facilitar el control remoto del motor. Para su creación se ha usado el entorno de programación MIT App Inventor [50], es de libre acceso y fue creado en 2012 por Massachusetts Institute of Technology. Este es un entorno intuitivo y visual para la creación de aplicaciones para smartphone o tablet apto para todo tipo de usuarios. Por el momento, sólo está disponible la creación de aplicaciones para dispositivos con sistema operativo Android, aunque se está trabajando en la adaptación para iOS.

La creación de aplicaciones en MIT App Inventor se realiza online asociado a una cuenta Google desde el ordenador o cualquier otro tipo de dispositivo y, una vez terminado el diseño y la programación, hay que generar un archivo *.apk* para su instalación en un dispositivo Android. La creación de la aplicación se divide en dos secciones: el diseñador y los bloques. En la parte del diseñador se confeccionan las pantallas de la aplicación con una serie de elementos ya configurados y clasificados por interfaz de usuario, disposición, media, dibujo y animación, mapas, sensores, social, almacenamiento, conectividad y otras extensiones. Por otro lado, en la sección de bloques se programa la función de cada elemento y la relación entre ellos. Es una programación muy sencilla en la que se van encajando bloques a modo de puzle. Los bloques definen funciones asociadas a los elementos introducidos en el diseñador. Esto facilita la programación ya que no hay que conocer el lenguaje y redactar el programa sino entender las opciones que se ofrecen para cada elemento y encajarlas adecuadamente. A parte de los bloques asociados a los elementos introducidos en el diseño, hay otros bloques genéricos que están agrupados por bloques de control, lógicos, matemáticos, de texto, listas, colores, variables y de procedimientos. Además, mediante la aplicación *MIT AI2 Companion* (ver figura 5.16), se puede conectar un dispositivo para ver al instante las modificaciones realizadas en la aplicación que se está creando y comprobar simultáneamente su funcionamiento antes de generar el fichero definitivo. Esta conexión puede realizarse por un código de caracteres o por un código QR.

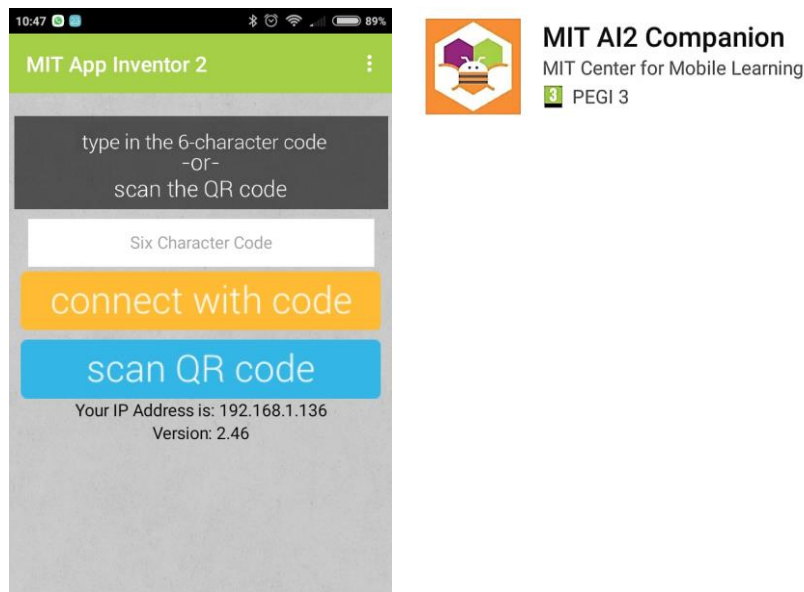


FIG. 5.16 PANTALLA INICIAL E ICONO DE LA APLICACIÓN *MIT AI2 COMPANION*

La aplicación que se necesita para el control remoto del motor tiene que recoger el número de pasos, el sentido de giro y la velocidad en milisegundos. Con esos datos debe formar la URL y enviarla al servidor. Esa URL debe tener la raíz adecuada para ejecutar correctamente las líneas de código asignadas en el programa de la placa NodeMCU y además incluir los parámetros de consulta según los datos introducidos por el usuario. Por último, la aplicación deberá mostrar en pantalla la respuesta que recibe del servidor.

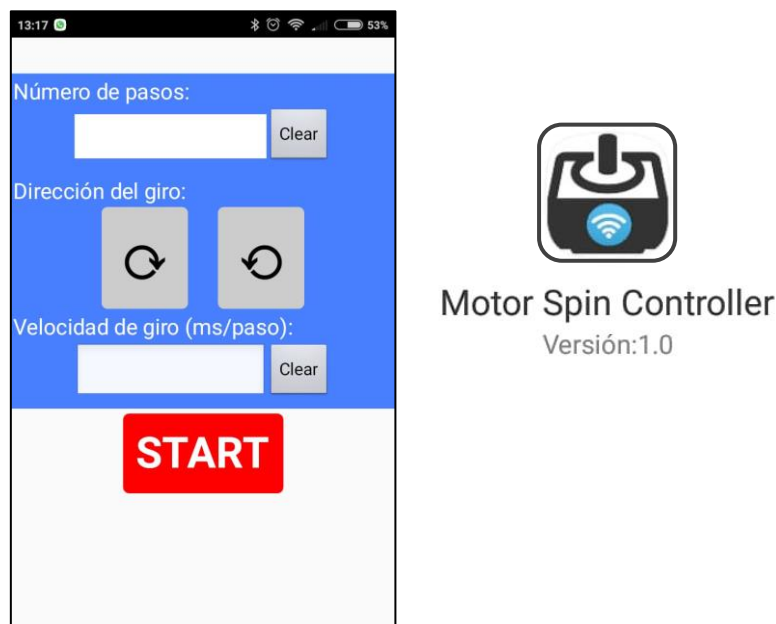
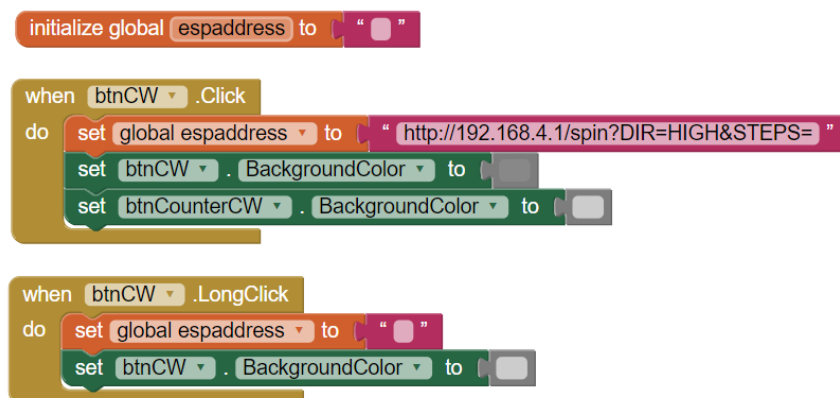


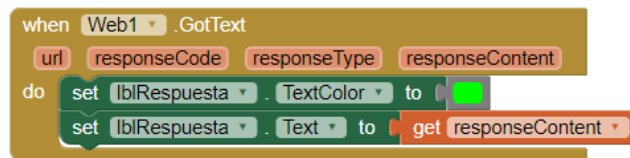
FIG. 5.17 PANTALLA E ICONO DE LA APLICACIÓN *MOTOR SPIN CONTROLLER*

En la figura 5.17 se muestra la pantalla de la aplicación creada y su icono. Para obtener el número de pasos y la velocidad de giro se han insertado campos de texto configurados únicamente para números, y un botón ‘clear’ para borrar el contenido de dichos campos; y para el sentido de giro se han añadido dos botones rotulados con iconos que indican ambos sentidos. También se han añadido etiquetas para señalar al usuario el dato a introducir. A continuación, se ha añadido un botón ‘btnSTART’ que enviará la consulta al servidor cuando se pulse iniciándose así el giro. Además, hay tres elementos no visibles en la pantalla: una etiqueta vacía llamada ‘lblRespuesta’, un notificador y un elemento web. La etiqueta está colocada en la parte superior y mostrará la respuesta del servidor cuando se reciba. El notificador muestra un cuadro de alerta indicando la falta de algún dato de giro. Y, por último, el elemento web permite gestionar solicitudes HTTP por lo que será el encargado de establecer la comunicación con el servidor. En esta sección también se define el nombre de la aplicación y su icono.

En la sección de bloques hay que construir la URL con los datos introducidos, enviarla al servidor para ejecutar el giro descrito y recibir una respuesta. La URL a construir es <http://192.168.4.1/spin?DIR=HIGH&STEPS=numero&SPEED=numero>. Para ello se ha definido la variable global ‘espaddress’ en la que, uniendo cadenas de caracteres, se formará la URL requerida. Tras inicializar la variable se define el primer parámetro, el sentido de giro. Cuando se pulsa uno de los botones del sentido de giro se le asigna a la variable ‘espaddress’ el inicio de la URL indicando a continuación el valor de ‘DIR’: ‘HIGH’ para el sentido de las agujas del reloj y ‘LOW’ para el sentido contrario. Para ayudar al usuario, se han configurado los colores de estos botones de tal manera que el botón seleccionado se oscurece, si se cambia la elección se intercambian los colores y si se quiere simplemente quitar la selección hay que pulsar con clic largo el botón oscurecido.



Finalmente, la etiqueta 'lblRespuesta' muestra la respuesta del servidor, ver figura 5.19. Gracias a cómo está construido el programa de la placa, este mensaje se envía cuando el giro se ha completado. Así, mientras el motor está girando por pantalla se muestra el mensaje de la izquierda, y cuando el motor ha terminado de girar se muestra el mensaje de la derecha.



El código completo y una guía rápida de manejo de la aplicación se encuentran adjuntos en el anexo C y anexo D respectivamente.

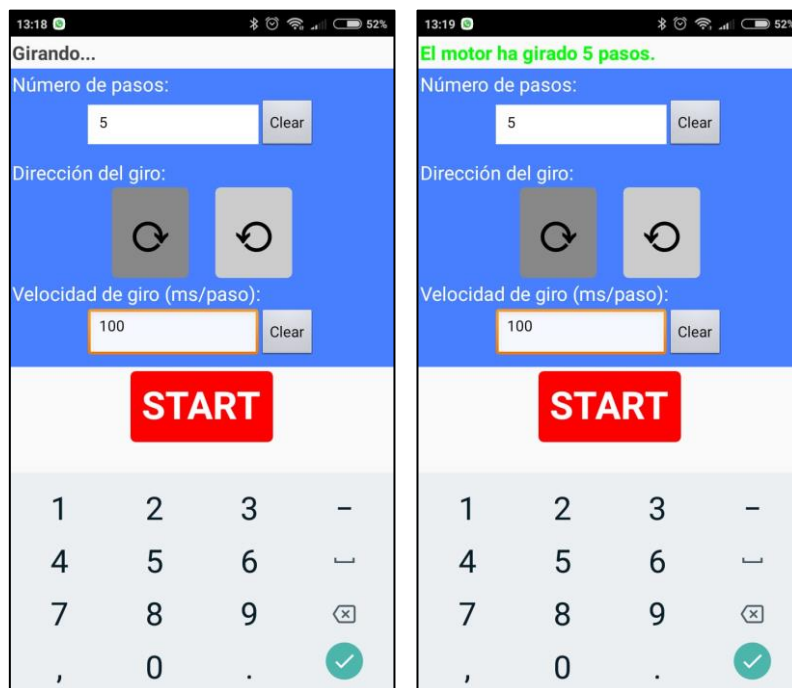


FIG. 5.19 MENSAJE DE FUNCIONAMIENTO Y DE RESPUESTA

5.5. Montaje del circuito electrónico de control

En este apartado se detallan las conexiones entre los elementos electrónicos descritos previamente. El esquema del montaje global queda representado en la figura 5.20 con cinco elementos conectados: fuente de alimentación, placa NodeMCU, driver DRV8825 ventilador y motor paso a paso NEMA23.

La placa NodeMCU está alimentada con 5V y se conecta al driver por los pines *D1* y *D2*. Estos pines de salida se corresponden con las señales de pasos y dirección de giro respectivamente, y son asignados en el programa de la placa. El motor se conecta por sus cuatro cables a los pines *B2*, *B1*, *A1* y *A2* del driver como se indicada en el esquema, de no ser así, el motor no funcionaría correctamente. El driver es el elemento intermedio entre la placa y el motor. Por un lado, recibe las señales de pasos y dirección y, por otro lado, alimenta y controla el movimiento del motor según las señales recibidas. La alimentación del motor se realiza a través de los pines V_m y *GND* del driver y puede variar entre 8.2 y 45V. Por escoger un valor medio de ese voltaje y por ser 30V la tensión máxima que la fuente utilizada puede suministrar, se ha ajustado la alimentación del motor a 27V. Además, el driver necesita tener en nivel alto los pines \overline{RESET} y \overline{SLEEP} ya que de lo contrario se activarían dichos estados de energía y por ello son conectados a 5V. Para finalizar, el ventilador se alimenta también con 5V y no requiere ninguna otra conexión.

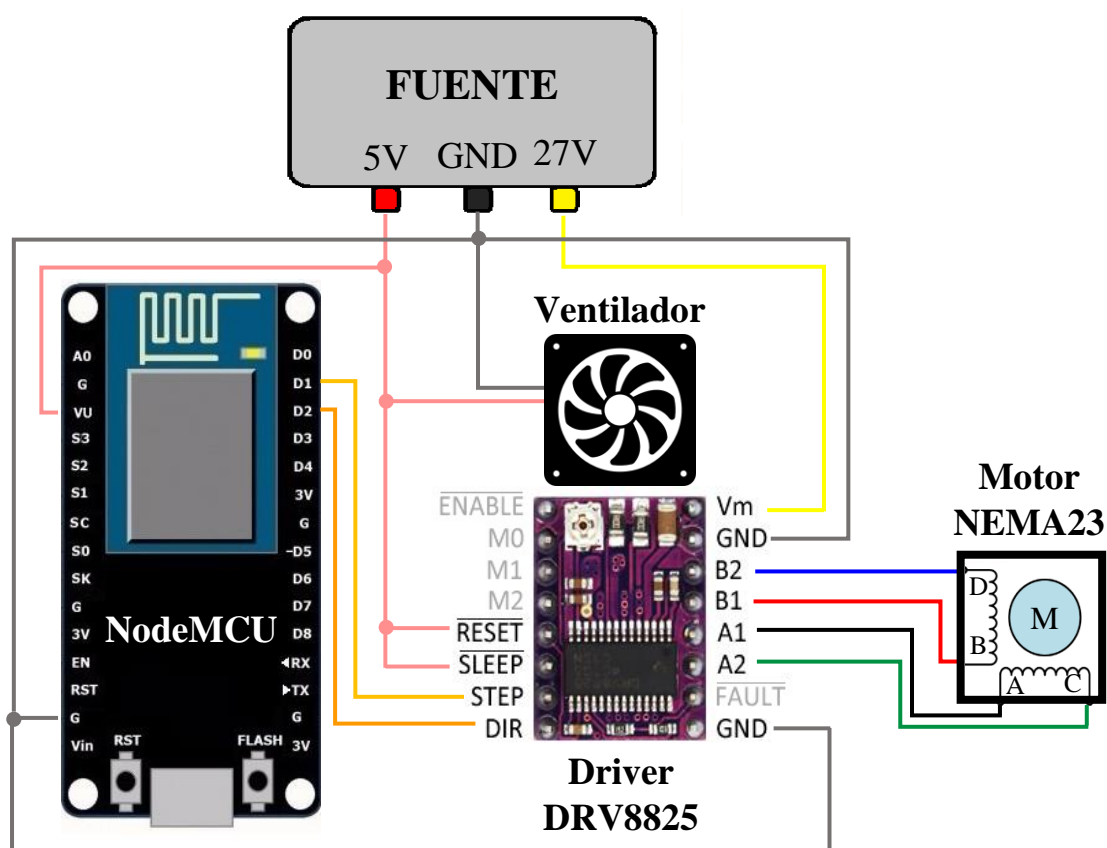


FIG. 5.20 ESQUEMA DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO (FULL STEP)

CAPÍTULO VI: ENSAYO DE LA LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

En este apartado se describirá y analizará el ensayo de la localización de una única fuente de descargas parciales llevado a cabo en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Carlos III de Madrid. El método empleado para la localización por dos antenas ha sido el ajuste de la función periódica, explicado en el subapartado 3.2, y para la determinación del origen de las señales recibidas se ha utilizado el criterio de Hinkley. En primer lugar, se mide con un osciloscopio las señales recibidas por las antenas cada cierto ángulo a lo largo de una vuelta completa. Después, se obtienen los valores de TDoA en cada posición angular. Con dichos valores se forma la función periódica y, por último, se realiza el ajuste de la función para obtener una expresión analítica que, por comparación con la ecuación geométrica (3.11), se consiguen los parámetros de la posición de la fuente emisora.

6.1. Puesta en marcha

Para comenzar, hay que preparar la fuente de descargas parciales. Para generar dichas descargas se necesita un material aislante entre dos conductores a distinto potencial y para ello se ha conectado a tierra la superficie exterior del aislante de un cable de alta tensión. En la figura 6.2 se puede ver el cable conectado a la fuente de alta tensión, y en la imagen ampliada, el anillo de cobre conectado a tierra que recubre la superficie del cable. En esa región se producirán descargas parciales superficiales. Seguidamente, hay que fijar la posición del soporte junto con la electrónica de control, siendo el origen de coordenadas la intersección del eje vertical de la antena 1 con el plano horizontal de la antena 2. La figura 6.1 muestra la geometría del problema en los planos XY y XZ. Por otro lado, las antenas son monopolos omnidireccionales simples de 10 cm de longitud que, a pesar de tener una buena respuesta en el rango de frecuencias en que se emite una descarga parcial, responden peor en señales emitidas por debajo de su plano horizontal. Para finalizar la puesta en marcha, se conectan las antenas al osciloscopio. Los dos cables coaxiales deben tener la misma longitud para que los tiempos de llegada de las señales sean comparables.

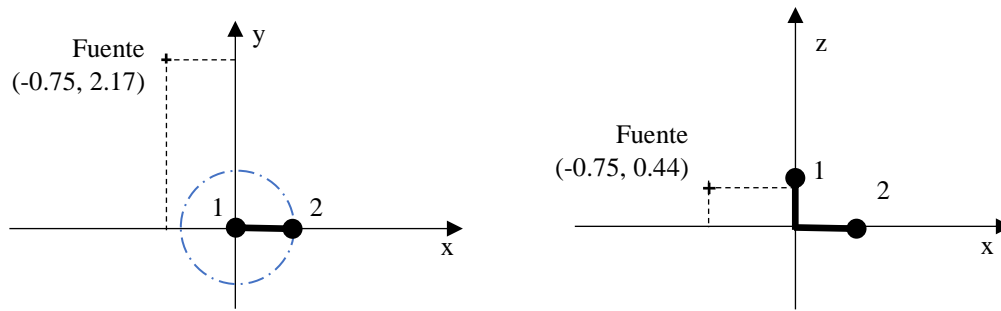


FIG. 6.1 COORDENADAS DE LA FUENTE RESPECTO A LA POSICIÓN INICIAL DE LAS ANTENAS (0°) EN LOS PLANOS XY (IZQ.) Y XZ (DCHA.)

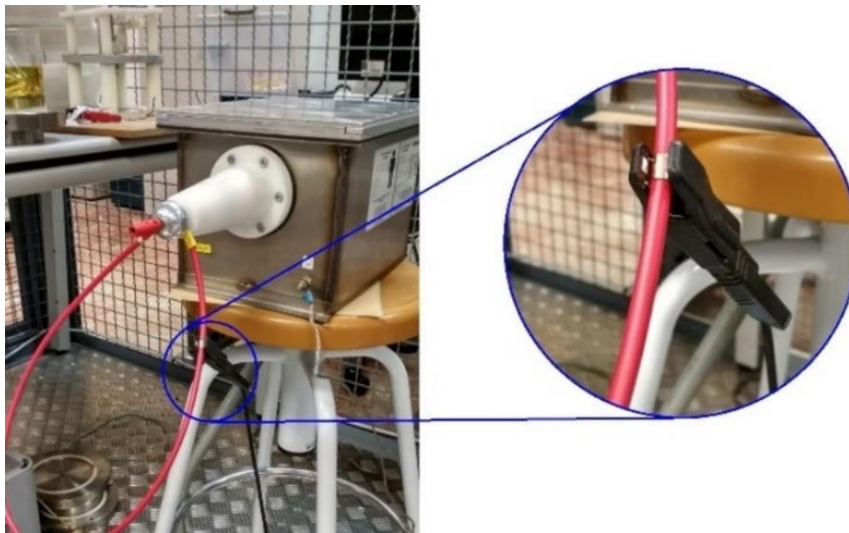


FIG. 6.2 FUENTE DE DESCARGAS PARCIALES

6.2. Datos y medidas

La medición de las señales ha de tomarse en distintas posiciones angulares hasta completar una vuelta. En este caso se han realizado giros cada 10 pasos, es decir, cada 18° obteniendo así 20 medidas distintas para la diferencia de tiempos de llegada, TDoA. Gracias a la automatización de la estructura, no es necesario desconectar la fuente de alta tensión en cada giro para moverla manualmente, sino que se acciona el movimiento con la aplicación desarrollada en el apartado 5.4. Esto, además de seguridad aporta precisión en el giro.

Las descargas parciales son un fenómeno estocástico, por ello una única medición no es válida para obtener el valor de TDoA. En este caso se han medido 50 descarga parciales en cada posición angular, obteniendo un valor de TDoA para cada una de las descargas. Como se detallará en el siguiente apartado, se ha tomado la moda como valor final de

TDoA en cada ángulo. El osciloscopio tiene una frecuencia de muestreo de 5GS/s, lo que equivale a un período de muestreo $T_s = 200$ ps. Además, se han tomado frames de 1 μ s por lo que cada descarga parcial estará representada por 5000 muestras.

Por último, la fuente de alta tensión debe tener un voltaje similar a lo largo de toda la toma de medidas ya que esto influye en la forma de la descarga. En este caso, la tensión de la fuente se ajustó a un valor aproximado de 10.5 kV.

La figura 6.3 es un ejemplo del display del osciloscopio tras obtener las medidas de 50 descargas parciales en un ángulo determinado. Por otro lado, la tabla 6.1 recoge los datos de medida descritos anteriormente.

TABLA 6.1 DATOS DE MEDIDA PARA LA LOCALIZACIÓN

Intervalo angular	18°
Período de muestreo, T_s	200 ps
Muestra por DP	5000
Número de DP	50
Tensión de la fuente	10.5 kV

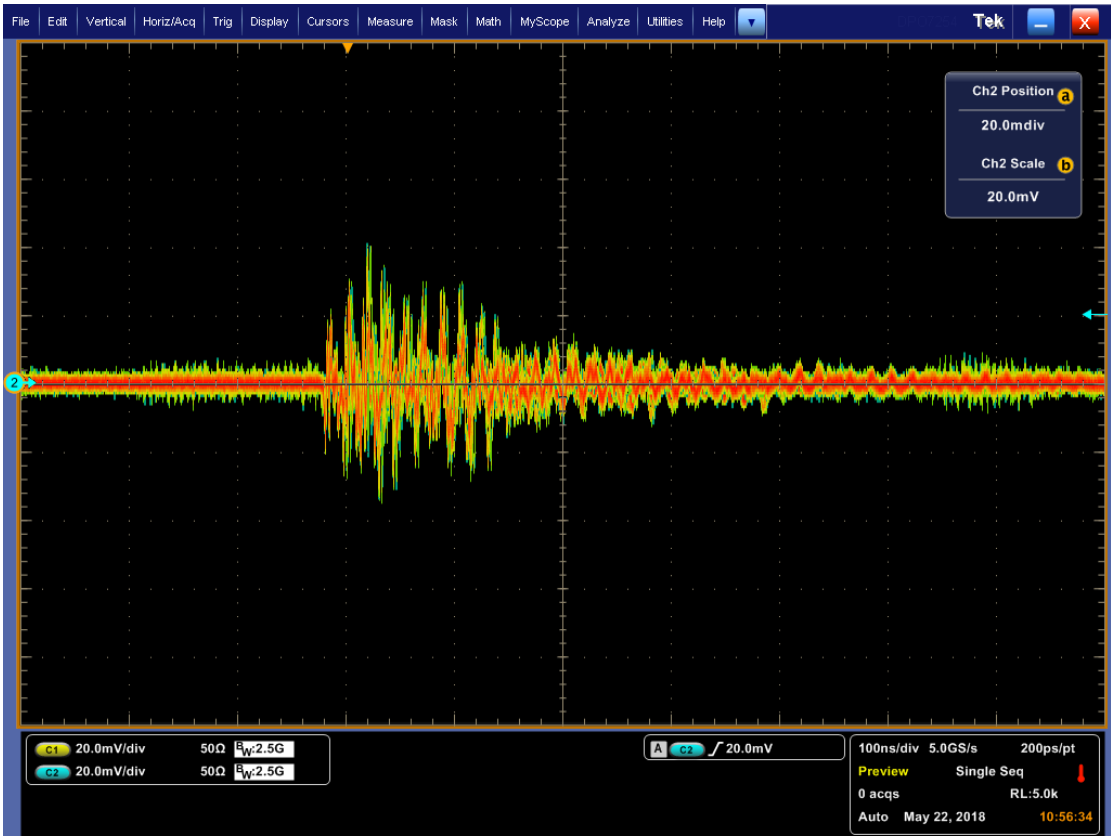


FIG. 6.3 DISPLAY DEL OSCILOSCOPIO TRAS OBTENER LAS 50 MEDIDAS DE DP EN 0°

6.3. Análisis de medidas y localización

El siguiente paso es el análisis de las señales medidas en el laboratorio para obtener la función periódica de TDoA frente a la posición angular. Ajustando dicha función a la expresión analítica, se localiza la fuente.

El análisis de las medidas se lleva a cabo mediante dos programas de Matlab. Los datos proporcionados por el osciloscopio forman un vector por cada canal con la totalidad de las muestras recogidas, es decir, en cada ángulo proporciona dos vectores de longitud 250000. El primer programa separa dichos vectores en 50 señales de 5000 muestras cada una formando una matriz de 2D por canal. Juntando ambas matrices se genera otra de 3D. La primera dimensión se corresponde con el número de señales medidas, la segunda con el número de muestras por señal y la tercera el número del canal. De esta manera el primer programa procesa los datos del osciloscopio para obtener una matriz de 3D en cada ángulo. Con el segundo programa se obtiene un valor de TDoA para cada posición angular a partir de la matriz creada. Primero interpola las medidas para obtener una mayor precisión. Después calcula el inicio de las señales de cada canal mediante el criterio de Hinkley basado en la modificación de la energía acumulada (apartado 2.2). Calculando la diferencia de los inicios entre todas las señales del canal 1 y el canal 2, obtiene una distribución de valores de TDoA. El programa calcula la moda y muestra el histograma de los valores para poder determinar el mejor valor final de TDoA. En resumen, usando los programas descritos se obtiene un valor de TDoA para cada posición angular siendo, en este ensayo, un total de 20 datos. Con esos valores se grafica la función periódica.

El ajuste de la función obtenida se realiza también con Matlab mediante la aplicación Curve Fitting Toolbox. Para ello se han escogido las coordenadas cartesianas siendo la ecuación (3.11) la expresión analítica para el ajuste. Las coordenadas de la antena 1 son constantes y se muestran en la figura 6.1. Sin embargo, las coordenadas de la antena 2 dependen del radio y del ángulo de giro.

$$\text{Antena 1: } P_1 = (0, 0, z_1) \quad \text{con } z_1 = 0.5 \text{ m} \quad (6.1)$$

$$\text{Antena 2: } P_2 = (r \cos \theta, r \sin \theta, 0) \quad \text{con } r = 0.54 \text{ m y } \forall \theta \in (0, 2\pi)$$

Hay que tener en cuenta también las unidades de la ecuación. Los valores obtenidos de TDoA están en muestras, luego las coordenadas deberán introducirse en las mismas unidades. Además, los ángulos deben introducirse en radianes. Así, con las coordenadas

de la ecuación (6.1) y teniendo en cuenta las unidades se obtiene la expresión para el ajuste.

$$d = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + (z_s - 8.3)^2} - \sqrt{(x_s - 9 \cos \theta)^2 + (y_s - 9 \sin \theta)^2 + z_s^2} \quad (6.2)$$

En la ecuación anterior, d toma los valores de TDoA asociados a cada ángulo θ , y las coordenadas de la fuente x_s, y_s, z_s se obtienen como parámetros de la ecuación de ajuste.

6.4. Resultados del ensayo

En este apartado se recogen y analizan los resultados obtenidos en el ensayo de localización de la fuente de descargas parciales. Los valores máximos de TDoA en 2D serían igual al radio, es decir, 9 muestras (ver apartado 4.1). Como en este caso es un ensayo en 3D, el radio no es igual a la diferencia de las distancias sino de sus proyecciones horizontales por lo que los valores máximos de TDoA serán levemente superiores a 9 muestras. De esta manera, para determinar los valores de TDoA se ha tomado el valor más repetido descartando aquellos que estuvieran fuera del rango (-10,10). Los 20 valores de TDoA obtenidos con los programas de Matlab descritos en el apartado anterior se recogen en la tabla 6.2 donde además se comparan dichos valores con el valor teórico en cada posición.

TABLA 6.2 RESULTADOS DE TDoA PARA CADA POSICIÓN ANGULAR

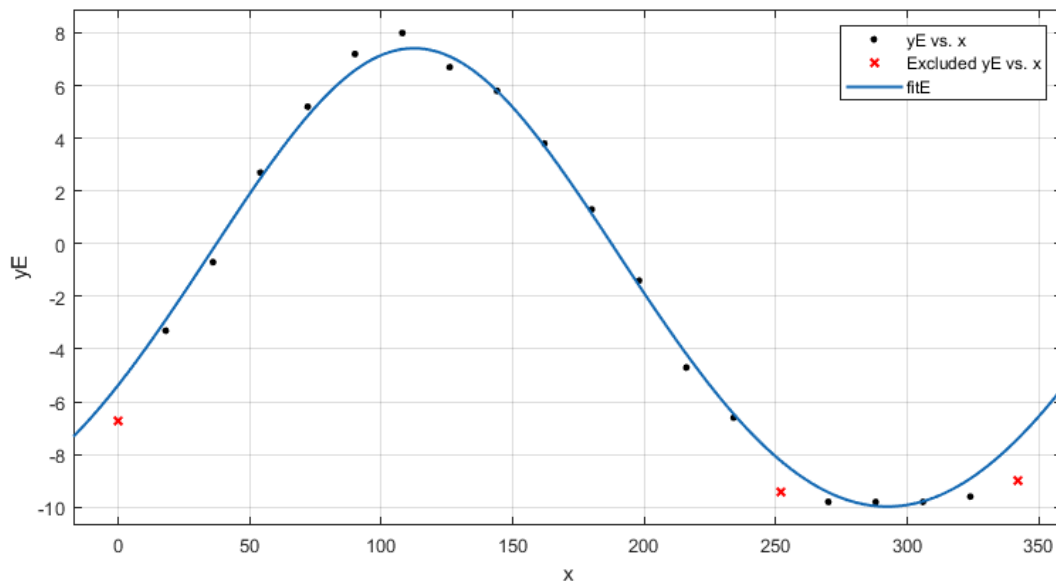
Ángulo	0°	18°	36°	54°	72°	90°	108°	126°	144°	162°
<i>TDoA teórico</i>	-4.53	-1.96	0.78	3.47	5.81	7.45	8.12	7.69	6.24	4.03
<i>TDoA obtenido</i>	-6.7	-3.3	-0.7	2.7	5.2	7.2	8	6.7	5.8	3.8

Ángulo	180°	198°	216°	234°	252°	270°	288°	306°	324°	342°
<i>TDoA teórico</i>	1.39	-1.38	-3.99	-6.25	-7.99	-9.11	-9.54	-9.26	-8.29	-6.68
<i>TDoA obtenido</i>	1.3	-1.4	-4.7	-6.6	-9.4	-9.8	-9.8	-9.8	-9.6	-9

Con estos datos se obtiene la función periódica de TDoA frente al ángulo, la cual ha de ajustarse a la ecuación (6.2). Para realizar el ajuste se han despreciado algunos valores que se alejaban demasiado de la curva de ajuste. Los resultados proporcionados por la aplicación Curve Fitting Toolbox son los mostrados en la tabla 6.3 y la figura 6.4. En dicha tabla se muestran también las coordenadas reales de la fuente.

TABLA 6.3 RESULTADO DEL AJUSTE: COORDENADAS DE LA FUENTE

<i>Coordenada de la fuente</i>	<i>Valor teórico [muestras]</i>	<i>Valor obtenido [muestras]</i>
x_s	-0,75	-0,86
y_s	2,17	2,08
z_s	0,44	0,58

**FIG. 6.4** REPRESENTACIÓN DEL AJUSTE POR MATLAB

Por último, la tabla 6.4 muestra el error cometido en cada dirección x , y , z . Estos errores pueden deberse a varias imprecisiones cometidas en el laboratorio. Durante la toma de medidas se observó que la antena 1 no funcionaba correctamente ya que mostraba por el osciloscopio una señal mucho más lenta que la mostrada por la otra antena, afectando a los valores de TDoA obtenidos para la localización. La causa podría haber sido las interferencias en la trayectoria o incluso las propias características de la antena y el cable que la unía al osciloscopio. Por otro lado, en la medida de las coordenadas reales de la fuente influye el error humano que puede oscilar entre ± 1 cm.

TABLA 6.4 ERROR OBTENIDO EN LA LOCALIZACIÓN

<i>Coordenada</i>	<i>Error [m]</i>	<i>Error [%]</i>
x_s	0,1074	14%
y_s	0,0924	4%
z_s	0,1422	32%
Error medio [%]		17%

CAPÍTULO VII: MARCO REGULADOR

Este trabajo está sujeto principalmente a dos normas del IEC (del inglés *International Electrotechnical Commission*) [51] . Esta organización fue fundada en 1906 y publica Normas Internacionales sobre tecnologías eléctricas, electrónicas y otras relacionadas.

7.1. IEC 60270: Técnicas de ensayo en alta tensión – Medidas de las descargas parciales.

Esta norma [8] es aplicable a la medición de descargas parciales en aparatos, sistemas o instalaciones eléctricas en pruebas de alta tensión alterna o continua. Se centra en las mediciones eléctricas de las descargas parciales, aunque también trata otros métodos no eléctricos. Estos métodos y el procesamiento digital de la medición eléctrica son usados para la localización de fuentes de descargas parciales.

Esta norma define la descarga parcial como “descarga eléctrica localizada que cortocircuita solo parcialmente el aislamiento entre conductores y que puede ser o no adyacente a un conductor”. Además, menciona que la causa general de las descargas parciales es la acumulación de tensión eléctrica en el material aislante o en la superficie del mismo. También habla de los pulsos producidos por las descargas parciales, lo cuales son usados para la localización de DP por método electromagnético: “Una descarga parcial que ocurre en el objeto de prueba produce un pulso de corriente. Un detector de acuerdo con las disposiciones de esta norma produce una señal de corriente o voltaje en su salida, proporcional a la carga del pulso de corriente en su entrada”.

Otras normativas de referencia incluidas en la IEC 60270 son:

- IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*.
- IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*.
- CISPR 16-1:1993, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus*.

7.2. IEC TS 62478: Técnicas de ensayo en alta tensión – Medidas de descargas parciales por métodos electromagnéticos y acústicos.

Esta norma [2] recoge las propiedades electromagnéticas y acústicas de una descarga parcial la cual ocurre en un aislamiento de un aparato eléctrico, además de la localización de fuentes de descargas parciales mediante la medición de dichas propiedades.

Esta normativa define descarga parcial como “fenómeno físico complejo que consiste en una descarga eléctrica localizada causada por la ruptura parcial de un medio aislante bajo la influencia de la tensión del campo eléctrico local”. También define el pulso de una DP como “pulso de corriente extremadamente rápido, cuyo tiempo de subida y ancho de pulso dependen del tipo de descarga, tipo de defecto, geometría y presión del gas”. El último término a destacar de esta norma es el efecto electromagnético de una descarga parcial definido como “pulsos de corriente de DP que dan como resultado la emisión de ondas electromagnéticas transitorias a rangos de frecuencia muy altos”.

Otras normativas de referencia incluidas en la IEC TS 62478 son:

- IEC TS 60034-27, *Rotating electrical machines – Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines.*
- IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.*

CAPÍTULO VIII: ENTORNO SOCIOECONÓMICO

8.1. Mercado actual

Actualmente en el mercado se pueden encontrar empresas que ofrecen servicios de mantenimiento y prevención de daños en el aislamiento de instalaciones eléctricas mediante el diagnóstico de descargas parciales. Hay empresas que utilizan el método de localización de cuatro antenas aportando al cliente la posición aproximada de defectos en el aislamiento de la instalación. Este es uno de los métodos más caros ya que precisa de un osciloscopio de cuatro canales, además de necesitar una frecuencia de muestreo alta para medir con precisión las rápidas señales emitidas por las descargas parciales. Otras empresas ofrecen un servicio más económico obteniendo como resultado únicamente la dirección en la que se encuentra la fuente de descargas parciales, es decir, un resultado menos concreto. Este método analiza el ángulo de llegada de la señal en lugar de medir tiempos de llegada.

La introducción del método de localización por dos antenas en el mercado aportaría un análisis de prevención y mantenimiento con resultados precisos aun precio intermedio. Gracias a la reducción del número de antenas, el osciloscopio requerido sólo debe tener dos canales. Esto reduce bastante el precio de adquisición del equipo, aunque no lo suficiente debido a la alta frecuencia de muestreo requerida para obtener una buena resolución en las medidas de las señales. Además de reducir costes por las características del osciloscopio, también se reduce a la mitad el material eléctrico requerido. De esta manera, lo óptimo sería encontrar la manera de reducir la frecuencia de muestreo manteniendo la precisión del resultado para así abaratar al máximo el precio de adquisición y poder ofrecer servicios a precios aún más bajos.

8.2. Plan de explotación

Para poder lanzar este nuevo método al mercado hay que añadir varias modificaciones al modelo actual. En primer lugar, la base del soporte debería modificarse para instalar en su interior el circuito electrónico de control. Con ello se ganaría un transporte más compacto del equipo. Y, en segundo lugar, si los tubos vertical y horizontal fueran desmontables se facilitaría aún más el transporte. Con estas modificaciones el equipo

completo se compondría por el soporte, el osciloscopio y los cables que lo unen a las antenas.

De este modo, para llevar a cabo el diagnóstico de DP en una instalación eléctrica habría que realizar el montaje del equipo. Para ello se montaría el soporte cerca de la instalación uniendo los tubos a la base y encendiendo la alimentación del soporte. Se colocaría el osciloscopio en una zona segura para el operario y se conectaría a las antenas del soporte. Entonces, comienza la toma de medidas manejando el movimiento de las antenas desde la zona segura mediante la aplicación móvil. Tras obtener los datos necesarios, se procesan y analizan desde un ordenador para obtener el resultado de la localización de las fuentes de descargas parciales.

8.3. Presupuesto del TFG

TABLA 8.1 COSTES TOTALES DEL TFG

Tipo de Coste		Importe [€]
Directos	Recursos humanos	23600
	Adquisición de material	589.73
Fijos amortizables (75%)	Equipos y Licencias	4268.78
COSTE TOTAL		28458.5

8.3.1. Costes directos: recursos humanos

Para los costes de recursos humano se ha hecho distinción entre el director del trabajo, el desarrollador y el equipo técnico que ha llevado a cabo la realización física del soporte. Cada uno de ellos tendrá un coste horario asociado que, junto con las horas de trabajo aproximadas, dan como resultado el coste de mano de obra.

TABLA 8.2 COSTES DE RECURSOS HUMANOS

Tipo de coste	Coste horario [€/h]	Cantidad [h]	Importe total [€]
Director	40	300	12000
Equipo técnico	30	120	3600
Desarrollador	20	400	8000
SUBTOTAL			23600

8.3.2. Costes directos: adquisición de material

En este apartado se recogen los gastos resumidos destinados a material fungible de laboratorio, así como los gastos de adquisición de los componentes electrónicos necesarios y del material utilizado en la construcción del soporte. El desglose completo de los gastos de material se encuentra en el anexo E.

TABLA 8.3 COSTES DE MATERIAL

Material	Importe [€]
Material de PVC para soporte (tubos y otras piezas)	146.02
Motores, drivers y microprocesador.	210.59
Consumibles eléctricos y fuente de alimentación para el motor y el circuito electrónico	233.12
SUBTOTAL	589.73

8.3.3. Costes fijos: equipos y licencias

Los costes fijos incluyen los gastos de adquisición de los equipos empleados y de las licencias de programa necesitadas para el desarrollo del trabajo. Los softwares utilizados en este trabajo son Autodesk Inventor para el prototipado de los primeros modelos, Matlab para el procesamiento y análisis de las medidas tomadas en el laboratorio y la aplicación Curve Fitting Toolbox de Matlab para la localización de la fuente mediante el ajuste de la función periódica. Por otro lado, los equipos y aparatos utilizados en este trabajo han sido un osciloscopio con cuatro canales de 5 GS/s, una fuente de alta tensión para generar las descargas parciales, un ordenador portátil para el análisis de las medidas tomadas y un Smartphone para el control remoto del soporte móvil. Estos gastos son amortizables en el tiempo y asumidos por la universidad, asignándoles el 15% del coste total. Conociendo los costes directos pueden estimarse los gastos fijos amortizables y el coste total del TFG, ver tabla 8.1.

CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES

El objetivo del TFG era diseñar y automatizar un soporte para dos antenas móviles con las que localizar una fuente de descargas parciales. Dicho objetivo se ha cumplido con buenos resultados ya que el soporte gira con la precisión angular adecuada para la localización, y la comunicación entre el usuario y el soporte es inmediata y correcta. Para la comprobación de la precisión angular se hizo rotar el soporte una vuelta completa desde una posición de referencia y se observó que aparentemente volvía a su posición inicial.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el ensayo de la localización son buenos ya que se aproximan bastante a la posición real de la fuente con un error medio del 17% siendo la dirección Y en la que mayor precisión se alcanza con un error del 4%. Sin embargo, la precisión de dichos resultados es mejorable ya que lo óptimo sería alcanzar un error medio igual o inferior al 10%. Para ello habría que buscar la razón de por qué la señal que aporta la antena 1 es más lenta que la señal de la antena 2.

Para determinar la causa del problema se realizaron varias pruebas. En primer lugar, se modificó la fuente de DP con intención de mejorar las características de las señales recibidas. Con este cambio la antena 2 proporcionaba señales con mayor energía y más rápidas, es decir, con un inicio de señal más claro. Sin embargo, la antena 1 seguía mostrando señales lentas y oscilantes. El siguiente paso fue comprobar el funcionamiento de la antena, para lo que se intercambiaron los sensores obteniéndose los mismos resultados. Se probó también a modificar la longitud de la antena 1 ya que con antenas más cortas se reciben frecuencias más altas y viceversa. La antena inicial medía 10 cm y se probó con 5 y 20 cm de longitud sin obtener mejoría. Con las dos pruebas anteriores quedaba descartado que el fallo estuviera en la propia antena. El siguiente factor a comprobar era la posición de las antenas. En un primer momento se pensó que la proximidad al suelo podría influir ya que este estaba forrado en chapa. Por ello se tomaron medidas bajando la antena 1 hasta una altura similar a la de la antena 2 respecto del suelo obteniéndose una pequeña mejoría en las señales. Este hecho llevó a pensar que quizá no afectara tanto la posición relativa al suelo sino la posición de la fuente respecto a la antena 1, ya que el tipo de sensor utilizado tiene una peor respuesta en las señales recibidas por debajo de su plano horizontal. Entonces se colocó la antena 1 de nuevo en su posición inicial y se elevó la fuente hasta una altura considerable respecto a ambos sensores. Es cierto que mejoraron ligeramente las propiedades de las señales con la nueva posición de

la fuente pero no lo suficiente. De esta manera quedaba descartada también la posición relativa de la antena 1 respecto al suelo y a la fuente como causa principal del problema. Llegados a este punto, se consideró la posibilidad de que fuera el cable que une la antena al osciloscopio el que estuviera distorsionando la señal del canal 1. Para comprobar esta suposición, se colocó un tercer sensor junto a la antena 1 conectado al canal 3 del osciloscopio. Esta antena mostraba señales con propiedades mucho mejores que las de la antena 1 lo que indica que la causa del problema podría estar en el cable que une la antena 1 al osciloscopio.

Sin embargo, cambiar el cable no es una tarea sencilla ya que el orificio que tiene el soporte para introducir los cables no es lo suficientemente grande para los conectores y dificulta también la introducción del cable por el tubo vertical. Por lo tanto, primero hay que quitar el conector para extraer el cable y cortar el nuevo exactamente con la misma longitud que el cable de la antena 2 para poder comparar los tiempos de llegada. Una vez cortado, hay que introducir el cable en el soporte y unirle después el conector de la antena. Con el cable cambiado habría que tomar nuevas medidas y comprobar si la señal de la antena 1 tiene propiedades similares a la de la antena 2. Obteniendo unas buenas señales con ambas antenas se conseguirían valores de TDoA más exactos reduciendo así el error en los resultados del ajuste.

Otro trabajo futuro a realizar en el soporte es la compactación del equipo para un transporte más cómodo. En el apartado 8.2 donde se habla del plan de explotación, se comenta la posibilidad hacer desmontables los tubos vertical y horizontal, pero para realizar esta modificación hay que pensar previamente qué hacer con las antenas y los cables que alojan en su interior. Otra acción que hacer para la compactación del equipo es instalar el circuito electrónico de control en el interior de la base del soporte, lo que supondría modificaciones tanto en la base como en el circuito.

En conclusión, el método de localización de descargas parciales con tan solo dos antenas es un novedoso método fácil de implementar que aporta una solución lo suficientemente precisa reduciendo el coste respecto a otros métodos similares del mercado actual.

REFERENCIAS

- [1] G. Robles, J. M. Fresno y J. M. Martínez-Tarifa, «Radio-frequency localization of multiple partial discharges sources with two receivers,» *Sensors*, 2018.
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC TS 62478: High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods.*, 2016.
- [3] R. Capella, «Biblioteca Técnica del Grupo Schneider PT-069,» Noviembre 2000. [En línea]. Available: <http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/General/pt-069c.pdf>. [Último acceso: 09 Mayo 2018].
- [4] U. Broniecki, «The importance of PD Testing on Power Transformers, OMICRON,» [En línea]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/novedades/details/la-importancia-de-las-pruebas-de-descargas-parciales-en-los-transformadores-de-potencia/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [5] J. M. Fresno de Marcos, *Classification and Localization of Electromagnetic and Ultrasonic Pulsed Emitters*, Leganés: universidad Carlos III de Madrid, 2017.
- [6] Laboratorio de investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT), «Descargas parciales,» 2000. [En línea]. Available: http://electronica.uc3m.es/~linealt/Documentos/descargas_parciales.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [7] U. Broniecki, «The importance of PD Testing on Power Transformers, OMICRON,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/novedades/details/la-importancia-de-las-pruebas-de-descargas-parciales-en-los-transformadores-de-potencia/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [8] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 60270: High-voltage test techniques - Partial discharges measurements*, 2015.
- [9] G. Robles, M. Sánchez-Fernández, R. Albarracín Sánchez, M. Rojas Moreno, E. Rajo Iglesias y J. M. Martínez Tarifa, «Antenna Parametrization for the Detection of Partial Discharges,» *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, vol. 66, pp. 469-475, 2013.
- [10] Y. Lu, X. Tan y X. Hu, «PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer,» *IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 147, n° 2, pp. 81-85, 2000.
- [11] D. M. R. Bucher, «A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-dimensional Hyperbolic Positioning System,» *VLSI Design*, vol. 15, n° 2, pp. 507-520, 2002.

- [12] Y. T. Chan y K. C. Ho, «A simple and efficient estimator for hyperbolic location,» *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, n° 8, pp. 1905-1915, 1994.
- [13] S. Bancroft, «An Algebraic Solution of the GPS Equations,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 21, n° 1, pp. 56-59, 1985.
- [14] Dannyjutech, «Sistemas de referencia y sistemas de coordenadas,» Entotno físico - Wordpress, enero 2015. [En línea]. Available: <https://physicstool.wordpress.com/2015/01/07/sistema-de-referencia-y-sistema-de-coordenadas/>. [Último acceso: mayo 2018].
- [15] R. Giannetti, «Feasibility study of in vivo bone depth measurement using high frequency ultrasound,» de *Instrumentatio and Measurement Technology Conference*, 2015.
- [16] F. Kreuger, «Partial discharge. XVIII. Errors in the location of partial discharges in high voltage solid dielectric cables,» *Electrical Insulation Magazine*, pp. 15-22, 1993.
- [17] M. D. Judd, Li Yang y I. B. B. Hunter, «Time delay estimation for UHF signals in PD location of transformes [power transformers],» de *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2004.
- [18] D. Hinkley, «Inference about the Change-Point from Cumulative Sum Test,» *Biometrika*, vol. 58, n° 3, pp. 509-523, 1971.
- [19] A. Moreno, «Correlación y espectro de señales deterministas,» Junio 2009. [En línea]. Available: http://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=11480/2011/1/52847/tema4_correlaci-2742.. [Último acceso: Mayo 2018].
- [20] L. Niemeyer, «A generalized approach to partial discharge modeling,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation*, vol. 2, n° 4, pp. 510-528, 1995.
- [21] G. Robles, J. M. Fresno y J. M. Martínez-Traifa, «Partial discharges and noise separation using spectral power ratios and genetic algorithms,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, n° 1, pp. 31-38, 2017.
- [22] J. M. Fresno, G. Robles y J. M. Martínez-Tarifa, «Planar Localization of Radio-Frequency or Acoustic sources with Two Receivers,» de *4th International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 2017.
- [23] G. Robles, J. M. Fresno, J. M. Martínez-Tarifa, J. A. Ardila-Rey y E. Parrado-Hernández, «Partial Discharge Spectral Characterization in HF, VHF and UHF Bands Using PArticle Swarm Optimization,» *Sensors*, vol. 18, 2018.
- [24] «Transmisiones por correas dentadas de tiempo y sincrónicas,» INTERMEC S.A., 2011. [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B4pXVb02YH6LOTIlZjA1ODctYTdiZC00ZjY2LTg2NmMtMGNjYWJjNjA5OWRh/view?ddrp=1&hl=es#>. [Último acceso: Mayo 2018].

- [25] Candido, «Engranajes,» Blogger.com, 2012. [En línea]. Available: <http://almadeherrero.blogspot.com.es/2012/02/engranajes.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [26] SKF, «Rodamiento de bolas: Diseños y versiones,» [En línea]. Available: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/designs-and-variants/index.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [27] SonRobots.com, «Motores, servomotores y motores paso a paso,» SonRobots.com - Tenda y escuela de robótica, 2018. [En línea]. Available: <http://sonrobots.com/arduinos/motores-servomotores-y-motores-paso-a-paso/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [28] Prometec, «Motores paso a paso,» [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/motores-paso-a-paso/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [29] Schneider Electric Motion USA, «NEMA23 - datasheet,» [En línea]. Available: <https://www.motion.schneider-electric.com/downloads/quickreference/NEMA23.pdf>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [30] National Electrical Manufacturers Association, «NEMA - National Electrical Manufacturers Association,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.nema.org/pages/default.aspx>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [31] J. Loureiro, «La comparativa definitiva de los drivers para motores paso a paso: DRV8825 vs A4988,» Staticboards, Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.staticboards.es/blog/drv8825-vs-a4988/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [32] Á. Franco García, «Autoinducción. Circuito R-L,» Diciembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/autoinduccin/autoinduccin.htm>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [33] L. Llamas, «Motores paso a paso con Arduino y Driver A4988 o DRV8825,» 23 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [34] Allegro MicroSystem, LLC, «DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A4988-Datasheet.ashx?la=es-ES&hash=A3ABE2DEA39592D34ED5A61930D8D2B98A56EDA5>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [35] Pololu Corporatio, «DRV8825 Stepper Motor Driver,» 2001-2018. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2133>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [36] GitHub, Inc., «Nodemcu,» 2018. [En línea]. Available: <https://github.com/nodemcu>. [Último acceso: Mayo 2018].

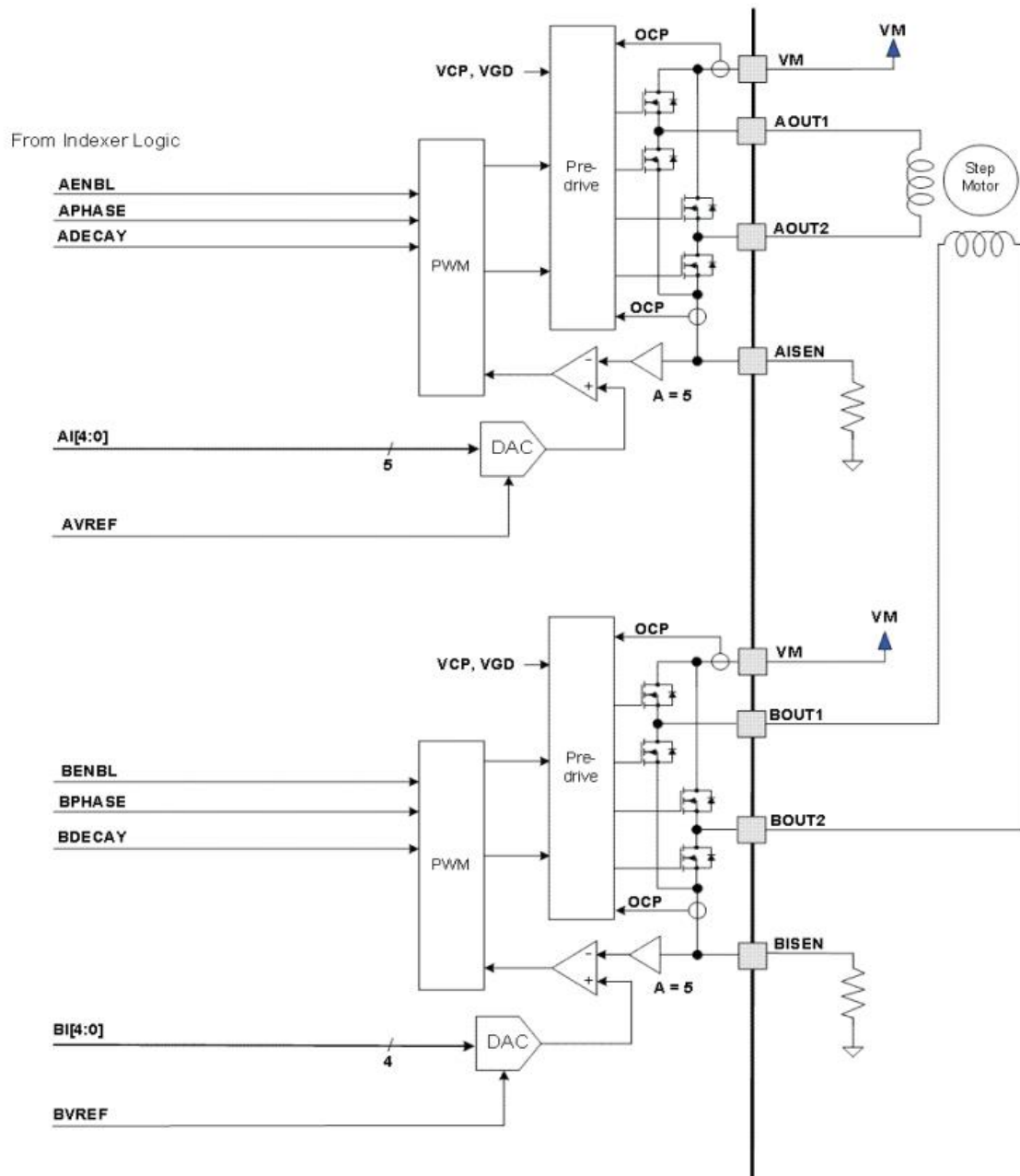
- [37] G. Martín, «Cómo programar NodeMCU con el IDE de Arduino,» Programafacil, 2017. [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/esp8266/como-programar-nodemcu-ide-arduino/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [38] R. H. Weber y R. Weber, «Itroduction,» de *Internet of Things*, Zürich, Springer, 2010, pp. 1-22.
- [39] L. del Valle Hernández, «NodeMCU tutorial paso a paso desde cero,» Programafacil, 2017. [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [40] Espressif IOT Team, «ESP8266EX Datasheet,» 2018. [En línea]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].
- [41] techtutorialsx, «ESP8266 Setting a simple http Webserver,» Octubre 20106. [En línea]. Available: <https://techtutorialsx.com/2016/10/03/esp8266-setting-a-simple-http-webserver/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [42] GitHub, Inc., «ESP8266WiFi,» GitHub, 2018. [En línea]. Available: <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266WiFi/src/ESP8266WiFi.h>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [43] GitHub, Inc., «ESP8266WebServer,» GitHub, 2018. [En línea]. Available: <https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266WebServer/src/ESP8266WebServer.h>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [44] Tech Target, «Puerto 80,» 2000-2018. [En línea]. Available: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/port-80>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [45] I. Grokhotkov, «Access Point,» ESP8266 Arduino Core, 2017. [En línea]. Available: <http://arduino-esp8266.readthedocs.io/en/latest/esp8266wifi/soft-access-point-class.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [46] Arduino, «begin(),» 2018. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/ServerBegin>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [47] techtutorialsx, «ESP8266 Webserve getting query parameters,» Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://techtutorialsx.com/2016/10/22/esp8266-webserver-getting-query-parameters/>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [48] RestApiTutorial, «HTTP status code,» [En línea]. Available: <http://www.restapitutorial.com/httpstatuscodes.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [49] Microsoft, «Content Type,» Microsoft developer network, 2018. [En línea]. Available: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms526971\(v=exchg.10\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms526971(v=exchg.10).aspx). [Último acceso: Mayo 2018].

- [50] Massachusetts Institute of Technology, «MIT App Inventor,» 2012-2017. [En línea]. Available: <http://appinventor.mit.edu/explore/index-2.html>. [Último acceso: Mayo 2018].
- [51] International Electrotechnical Commission, «Bienvenidos a IEC. Comisión Electrónica Internacional,» 2016. [En línea]. Available: http://www.iec.ch/about/brochures/pdf/about_iec/welcome_to_the_iec-s.pdf. [Último acceso: Mayo 2018].

LISTADO DE ACRÓNIMOS

DC	Corriente continua, del inglés <i>Direct Current</i>
DP	Descargas parciales
GA	Algoritmo genético, del inglés <i>Genetic Algorithm</i>
GPIO	Entradas y salidas digitales, del inglés <i>General Purpose Input/Output</i>
IoT	Internet de las cosas, del inglés <i>Internet of Things</i>
MCU	Microcontrolador, del inglés <i>Microcontroller Unit</i>
PSO	Optimización del enjambre de partículas, del inglés <i>Particle Swarm Optimization</i>
SPI	Comunicación serie periférica, del inglés <i>Serial Peripheral Interface</i>
TDoA	Diferencia de tiempos de llegada, del inglés <i>Time Difference of Arrival</i>
ToA	Tiempo de llegada, del inglés <i>Time of Arrival</i>
UHF	Frecuencia ultra alta (de 300 MHz a 3 GHz), del inglés <i>Ultra High Frequency</i>
VHF	Frecuencia muy alta (de 30 a 300 MHz), del inglés <i>Very High Frequency</i>

ANEXO A – Circuito interno del driver DRV8825



Texas Instruments, «DRV8825 Stepper Motor controller IC,» Julio 2014. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>. [Último acceso: Mayo 2018]

ANEXO B – Código de programación para NodeMCU

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>

ESP8266WebServer server(80);    //Se define el puerto de comunicación del servidor.

const char* ssid = "NodeMCU_ESP8266";    //Credenciales para conectarse a la red. SSID (Service Set Identifier)
const char* password = "Nema23/*";    // y contraseña.

String datoSteps = "";    //Recoge los pasos solicitados por el usuario.
String datoSpeed = "";    //Recoge la velocidad de giro solicitada (ms/paso).
String message = "";    //Mensaje que se muestra como respuesta en la web.
String resto = "";    //Número de pasos restantes, valor de variable 'r' convertido a string.

int steps = 0;    //Número de pasos. Máximo número de repeticiones del bucle que crea la señal.
int Speed = 0;    //Velocidad de giro. Período de la señal pulsada
int stepDelay = 0;    //Ancho de pulso.
int n = 0;    //Variable contador de los pasos acumulados.
int nant = 0;    //Variable que almacena el valor de pasos acumulados hasta el giro anterior.
int r = 0;    //Variable contador de los pasos restantes hasta llegar al límite de vuelta.

const int dirPin = D2;    //Variables asociadas a pines de la placa para: la direccion de giro
const int stepPin = D1;    //y la señal de pasos

void handleSpin() {    //URL de acceso: 192.168.4.1/spin?DIR=HIGH&STEPS=Value&SPEED=Value
    datoSteps = server.arg(1);    //Recoge el número de pasos que solicita el usuario y
    steps = datoSteps.toInt();    //lo transforma de tipo string a tipo int.

    datoSpeed = server.arg(2);    //Lo mismo con la velocidad de giro.
    Speed = datoSpeed.toInt();
    stepDelay = Speed/2;    //Se define el ancho de pulso a partir del período de la señal.

    nant = n;    //Se almacena el número de pasos acumulado hasta el giro anterior.
```

```

if(server.arg(0)=="HIGH"){           //se define la dirección de giro
    digitalWrite(dirPin, HIGH);
    n=n+steps;                       //Se añade a la cuenta los pasos de giro con dirección HIGH (+)
}else{
    digitalWrite(dirPin, LOW);       //Se añade a la cuenta los pasos de giro con dirección LOW (-)
    n=n-steps;
}

if ((n<=200)&&(n>=-200)){             //Si no ha llegado al límite de vueltas:
    for (int x = 0; x < steps ; x++) { //Bucle para crear la señal pulsada. Cada repetición es un pulso.
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        delay(stepDelay);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delay(stepDelay);
    }

    message = "El motor ha girado " + datoSteps + " pasos.";
    server.send(200, "text/plain", message); //Envío de respuesta del servidor.
}else{
    //Si se alcanza el límite de vueltas:
    r = 200-abs(nant); //Calcula los pasos que quedan disponibles hasta el límite y
    resto =String(r);  //transforma ese valor en string para mostrarlo en 'message'.
    n= nant;           //Se reestablece el valor de n porque no se ha girado.

    message = "ERROR! Solo quedan " + resto + " pasos disponibles en esta dirección";
    server.send(200, "text/plain", message); //Envío de repuesta del servidor.
}
}

void setup() {

    pinMode(stepPin,OUTPUT);           //Se definen los pines D1, D2, y D0 como salidas digitales.
    pinMode(dirPin,OUTPUT);
    pinMode(microStepping,OUTPUT);

    Serial.begin(115200);               //Se fija la velocidad del puerto serie para la depuración del programa.
    WiFi.softAP(ssid, password);       //Se crea el punto de acceso con SSID y contraseña. (IP: 192.168.4.1)
}

```

```

while (WiFi.softAP(ssid, password)== false){ //Comprobación de la creación del punto de acceso.
  delay(500);
  Serial.print("\nCreating Access Point...");
}

Serial.print("\n\nAccess Point CREATED");
Serial.print("\n\nssid: NodeMCU_ESP8266");
Serial.print("\npassword: Nema23/*");

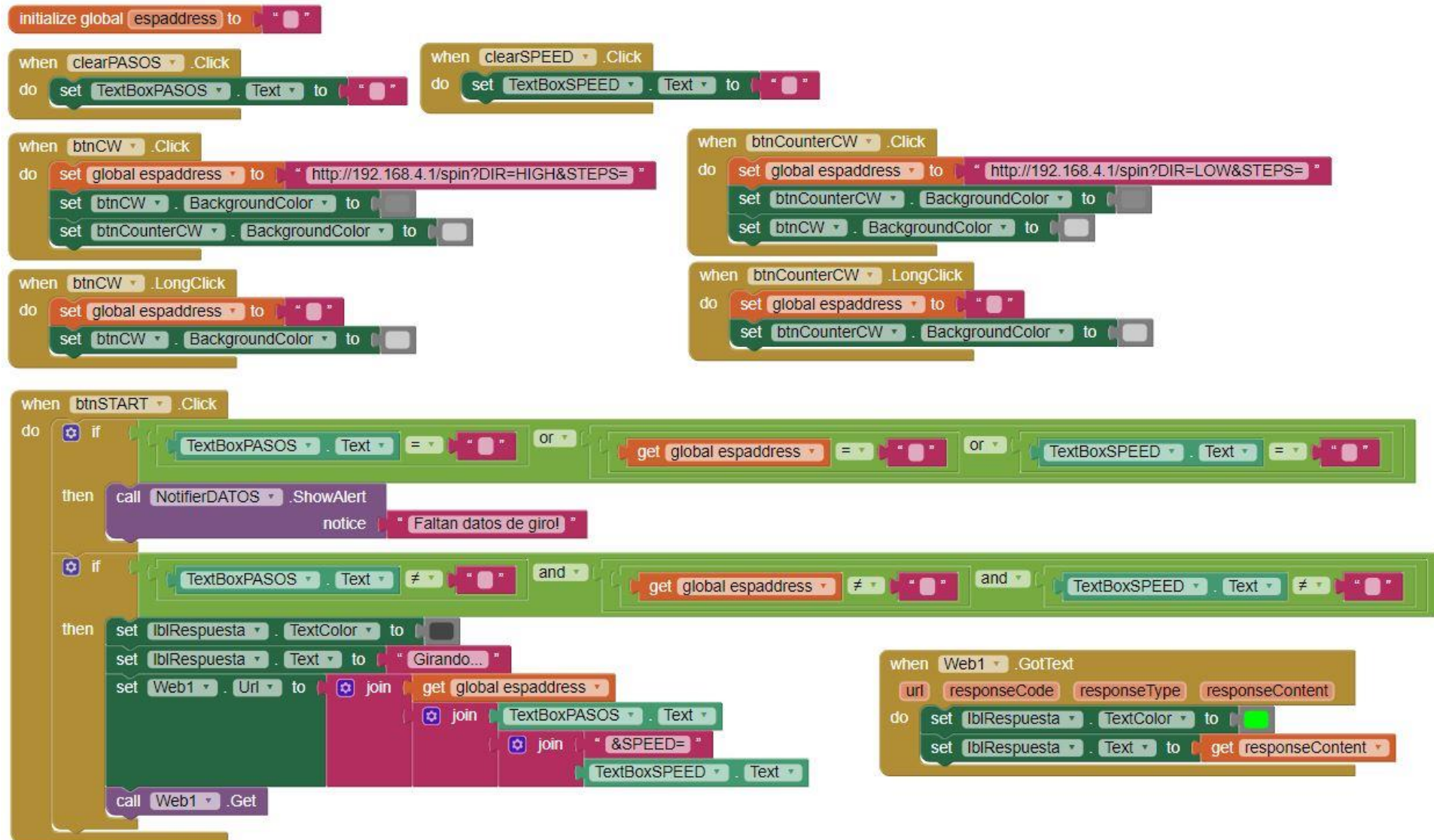
server.on("/spin", handleSpin); //Se asigna la función a ejecutar cuando el servidor recibe la raiz "/spin".

server.begin(); //Inicio del servidor.
}

void loop() {
  server.handleClient(); //Maneja la solicitud HTTP.
}

```


ANEXO C – Programación por bloques de la aplicación *Motor Spin Controller*



ANEXO D – Guía rápida de uso de la aplicación *Motor Spin Controller*



Motor Spin Controller
Versión:1.0

*Aplicación sólo disponible para Android

- 1) Instale la aplicación en su dispositivo.
- 2) Conéctese a la WiFi de la placa NodeMCU. Asegúrese antes de que está encendida.

Nombre: NodeMCU_ESP8266
Contraseña: Nema23/*
- 3) Abra y ejecute la aplicación *Motor Spin Controller*
- 4) Introduzca los datos de giro:
 - Para rellenar el número de pasos y la velocidad de giro haga clic en los campos y teclee el número deseado. En caso de querer limpiar dichos campos, haga clic en el respectivo botón 'Clear'.
 - Para seleccionar la dirección de giro pulse sobre el botón deseado. En caso de querer cambiar la dirección, pulse el otro botón. Si lo que quiere es deshacer la selección, pulse con clic largo sobre el botón marcado.
- 5) Pulse 'START' y la estructura comenzará a girar. Recibirá un mensaje en la pantalla cuando el giro se haya completado.



ANEXO E – Costes de adquisición de material

Período: 1 de 1							
Descripción	Tipo	Concepto Genérico	Fecha Operación	Fecha Pago	Proveedor	Importe Operación	Importe Gastado
E2018/04575 Factura: 4 - Adquisición de materiales, tubos y piezas de PVC.	GE	Fungible laboratorio	26/02/2018	05/04/2018	MANZANO, S.L.,	16,7	13,80
E2018/04655 Expte. ROBLES-4440 - Factura: 00230 – Material para desarrollo de un sistema móvil de antenas: Motor + Microprocesador.	GE	Fungible laboratorio	07/03/2018	04/04/2018	SOLECTRO SHOP	32,43	26,80
E2018/04945 Factura: 181089 - Adquisición de Placa PVC y varios componentes de PVC para diseño de estructura móvil para la medida de descargas parciales con antenas.	GE	Fungible laboratorio	12/03/2018	12/04/2018	PHEMSA	159,99	132,22
E2018/05910 Expte. ROBLES-4440 - Factura: 00326 - drivers y motores para el control de una estructura móvil de antenas para la medida de descargas parciales en UHF.	GE	Fungible laboratorio	03/04/2018	25/04/2018	SOLECTRO SHOP	54,2	44,79
E2018/05915 Expte. ROBLES-4440 - Factura: 62289564 - Drivers para el control de motores paso a paso en uno de los montajes con antenas	GE	Fungible laboratorio	11/04/2018	18/04/2018	DIGI KEY CORPORATION	168,19	139
E2018/07274 Factura: 61338666 - Adquisición de Consumibles de antena móviles para la medida de descargas parciales en UHF, fuente de alimentación para el motor y electrónica del sistema móvil de antenas.	GE	Fungible laboratorio	16/04/2018	17/05/2018	RS AMIDATA, S.A.U.	282,08	233,12
TOTAL GASTADO						589,73	